





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**PROJETO PERFORMATIVO NA PRÁTICA
ARQUITETÔNICA RECENTE: Estrutura Conceitual**

Max Lira Veras Xavier de Andrade

CAMPINAS

2012

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO**

Max Lira Veras Xavier de Andrade

**PROJETO PERFORMATIVO NA PRÁTICA ARQUITETÔNICA
RECENTE: Estrutura Conceitual**

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil na área de concentração em Arquitetura e Construção.

Orientadora: Prof^a. Dra. Regina Coeli Ruschel

Coorientadora: Prof^a Dra. Rivka Oxman

CAMPINAS

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

An24p Andrade, Max Lira Veras Xavier de
Projeto performativo na prática arquitetônica recente:
estrutura Conceitual / Max Lira Veras Xavier de
Andrade. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientadores: Regina Coeli Ruschel, Rivka Oxman.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura
e Urbanismo.

1. Modelagem de informação da construção. I.
Ruschel, Regina Coeli. II. Oxman, Rivka. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Título em Inglês: Performative design in recent practice: conceptual framework

Palavras-chave em Inglês: Building information modeling

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Maria Gabriela Caffarena Celani, Elisabetta Romano, Sergio
Scheer, Daniel de Carvalho Moreira

Data da defesa: 27-02-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**PROJETO PERFORMATIVO NA PRÁTICA
ARQUITETÔNICA RECENTE: Estrutura Conceitual**

Max Lira Veras Xavier de Andrade

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



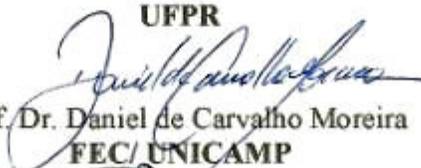
Prof. Dr. Regina Coeli Ruschel
Presidente e Orientadora FEC / UNICAMP



Prof. Dr. Maria Gabriela Caffarena Celani
FEC / UNICAMP



Prof. Dr. Sérgio Scheer
UFPR



Prof. Dr. Daniel de Carvalho Moreira
FEC / UNICAMP



Prof. Dra. Elisabetta Romano
UFPB

Campinas, 27 de fevereiro de 2012

Dedicatória

Ao meu pai pelo exemplo de perseverança e dedicação à pesquisa e ao conhecimento, e à minha mãe por todo apoio e amor incondicional.

Agradecimentos

Muitas pessoas participaram ajudando direta ou indiretamente nesta longa jornada de pesquisa e conhecimento que originou esta tese. Mais que um trabalho meu, acredito veementemente que este foi um trabalho coletivo, que surgiu de muitas mentes pensantes e de um esforço coletivo, que foi sintetizado por minha pessoa.

Antes de tudo, gostaria de fazer um agradecimento especial a minha orientadora Prof.^a Dr.^a Regina Coeli Ruschel pela amizade, dedicação e paciência. Graças à sua ajuda, foi possível concretizar esta tese.

Gostaria também de agradecer aos meus colegas de disciplinas e companheiros do GMIC, Sayonara, Marcelo, Adriano, Ana, Cesar, Marcel, Márcia, Mariana, a amizade e o incentivo consolidado ao longo desta jornada.

Também gostaria muito de fazer um especial agradecimento aos professores das disciplinas que cursei durante o doutorado, professores Lucila, Ana Lúcia, Gladis, Ana Maria, Núbia, Sílvia, Daniel, Paulo Bruna, Leandro, Doris; à Prof.^a Dr.^a Gabriela Celani, que muito me ajudou nas pesquisas, sempre disposta a conversar sobre minha pesquisa e a contribuir com novas ideias.

Aos professores, projetistas e pesquisadores, que me receberam ao longo destes anos de pesquisa, e me ajudaram a compreender o problema desta pesquisa.

Vale lembrar meus agradecimentos a Paula, secretária da Pós, que sempre esteve disposta a ajudar no que era possível.

Aos meus pais, meus irmãos e às minhas irmãs, o incentivo e a ajuda em alguns momentos da pesquisa, especialmente a Vladimir, que sempre deu palavras de apoio nos momentos difíceis.

À Prof.^a Dr.^a Rivka Oxman, que me recebeu na Universidade Technion e me ajudou muito a compreender o projeto digital.

Ao Prof. Rafael Sacks, que me recebeu em seu laboratório e me deu a oportunidade de participar de seu grupo de estudo.

À bibliotecária Maria Albuquerque, que auxiliou na revisão do texto.

À Universidade Federal de Alagoas que investiu na minha formação e viabilizou a minha pesquisa de doutorado.

À Capes e à Fapeal, agradeço o apoio oferecido na realização do doutorado.

Finalmente, gostaria de fazer um agradecimento especial a minha amada esposa e companheira, Melissa, que sempre esteve me apoiando nos momentos mais difíceis desta longa jornada. Graças à sua perseverança e disposição, eu realizei um dos meus sonhos.

Muito obrigado a todos vocês que estiveram presentes na minha vida nestes quatro anos de tese.

Resumo

ANDRADE, M. **Processo digital de geração da forma baseada no desempenho e com suporte em building information modeling**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2012. 399 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2012.

Dentro do universo dos projetos digitais baseados no desempenho, existe uma categoria que usa o desempenho não apenas como meios avaliativos, mas, acima de tudo, como instrumento de transformação das ideias e conceitos em matéria e forma arquitetônica. Usa-se mecanismos digitais que incorporam princípios de informatização à estruturas computacionais. Esta categoria de projeto digital é denominada Projeto Performativo. O presente trabalho tem como objetivo geral formular uma estrutura conceitual de processo de projeto digital que explique a prática de Projeto Performativo. A questão que se coloca é, quais são os pressupostos da prática de projeto que visem a incorporação do desempenho como propulsor do processo de geração da forma arquitetônica? Duas hipóteses foram investigadas neste contexto. A primeira hipótese foi que o modelo de projeto digital denominado performativo tem como pressuposto um processo de projeto baseado na colaboração, no processo de projeto automatizado, na modelagem paramétrica e na interoperabilidade. A segunda hipótese foi que é possível simular a prática de Projeto Performativo segundo estes pressupostos em experiências didáticas de atelier de projeto. Para atender aos objetivos gerais e específicos e responder às hipóteses levantadas, esta pesquisa desenvolveu uma investigação por meio da pesquisa exploratória e explicativa. A primeira iniciou com a busca da familiarização do problema por meio de uma revisão bibliográfica e de estudos de casos. Os estudos de casos foram desenvolvidos em escritório de projeto referência internacional. A segunda ocorreu pelo desenvolvimento de uma pesquisa experimental. Da análise de referencial teórico e dos estudos de casos emergiu uma estrutura conceitual para o projeto performativo caracterizada: pela prática essencialmente colaborativa multidisciplinar na síntese arquitetônica resultando em mudanças na apropriação das autorias; uso simultâneo de técnicas de projeto analógicas e digitais resultando na co-existência de estágios de decisão manuais, semi-automatizados e/ou automatizados; na modelagem paramétrica com maior ênfase ao projeto topológico substituindo tradição tipológica; na interoperabilidade marcada pelo fluxo de informação analógico e digital viabilizado pelo BIM - Building Information Modeling - como processo evolutivo fragmentado que permite liberdade necessária ao processo. A estrutura conceitual comporta a coexistência em um mesmo processo de projeto digital de diferente de métodos baseados no desempenho para resolução de diferentes partes ou sistemas do edifício. Essa coexistência de diferentes modelos e métodos permite resolver problemas complexos de projeto, abrigar e pacificar a controversa relação forma X função. O resultado de ordem experimental relacionado a validação da estrutura conceitual em experiência de ateliê de projeto confirmou que, apesar das limitações e restrições deste universo, foi possível estimular a morfogênese de modo criativo e eficiente. As experiências com o uso do Método BESO para a geração da forma pelo desempenho estrutural permitiram: criar múltiplas soluções de projeto, dentro de um espaço de soluções; utilizar facilmente o ferramental (mesmo não se conhecendo alguns conceitos relacionados ao comportamento da estrutura); possibilitar a realização de um número grande de ações cognitivas, num curto intervalo de tempo; realizar novas explorações formais; valorizar o desempenho estrutural como motor de geração da forma do edifício.

Palavras-chave: Projeto performativo, Modelo de projeto digital baseado no desempenho, Building Information Modeling.

Abstract

Within the universe of digital designs based on performance, there is a category that uses performance not only as evaluative means, but, above all, as a transformation tool for ideas and concepts in matter and architectonic form. It uses digital mechanisms that incorporate computational principles to computational structures. This category of digital design is called Performative Design. The general aim of the present paper is to formulate a digital design process conceptual framework that explains the Performative Design practice. The question to be made is what are the design practice assumptions aimed at the incorporation of performance as the propeller of the architectonic form generation process? Two hypotheses were investigated in this context. The first hypothesis was that the digital design model called performative has as assumption a design process based on cooperation, automated design process, parametric modeling, and interoperability. The second hypothesis was that it is possible to simulate the practice of Performative Design according to these assumptions in design workshop teaching experiments. In order to meet the general and specific aims and answer the raised hypotheses, this research has developed an investigation through exploratory and explanatory research. The first one started with the familiarization of the problem through literature review and case studies. The case studies were carried out in international reference design office. The second was done with experimental research. The analysis of the theoretical reference and case studies gave origin to a conceptual framework for the performative design characterized by the following factors: the essentially cooperative multidisciplinary practice in the architectonic synthesis resulting in changes in the appropriation of authorship; the simultaneous use of analogical and digital design techniques resulting in the coexistence of manual, semi-automated and/or automated decision stages; parametric modeling with emphasis on the topological design replacing typological tradition; interoperability marked by the analogical and digital information flow made possible by BIM - Building Information Modeling - as a fragmented evolutionary process which allows the necessary freedom to the process. The conceptual framework involves the coexistence, in the same process of digital design, of different methods based on performance for the resolution of different parts or systems of the building. Such coexistence of different models and methods allows the solution of complex design problems, and also harbors and pacifies the controversial relationship form X function. The experimental result related to the validation of the conceptual framework in the experience of design workshop has confirmed that despite the limitations and restrictions of this universe, it was possible to stimulate morphogenesis in a creative and efficient way. The experiences with the use of the BESO method for form generation by structural performance have allowed the following: to create multiple design solutions within a space of solutions, to easily use the tooling (even not knowing some concepts related to the structure behavior), to allow the running of a large number of cognitive actions in a short time, to make new formal explorations, to value the structural performance as the motor of building form generation.

Keywords: Performative design, Digital Performance-based Model, Building Information Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo de processo de projeto e sequência de decisões proposta por Markus (1971) _____	16
Figura 2.2 Modo alternativo de representar o processo de projeto apresentada por Broadbent (1973)	17
Figura 2.3 Mapa proposto por Markus (1971) das etapas da sequência de decisões com indicação dos <i>feedbacks</i> e <i>return loops</i> _____	18
Figura 2.4 Forma para representação da sequência de decisões do processo de projeto _____	18
Figura 2.5 A comunicação permite o fluxo de informações entre as etapas da sequência de decisões	23
Figura 2.6 Caminhos de acesso usando o SEED Layout _____	35
Figura 2.7 Uso da gramática da forma em educação: Museu de arte em Taipei (Taiwan): trabalho do aluno Wei-Cheng Chang _____	37
Figura 2.8 Exemplos de uso de algoritmo genético _____	41
Figura 2.9 Projetos que usaram análise sensitiva _____	42
Figura 2.10 Exemplos de uso do BESO _____	43
Figura 2.11 Método de propagação aleatória usado no projeto da cobertura da estação de metrô da Praça Garibaldi em Nápoles _____	44
Figura 2.12 Projeto Hylomorphic _____	45
Figura 2.13 Projeto de uma proposta para a Biblioteca Nacional de Praga usando CA _____	45
Figura 2.14 Representação da estrutura do ciclo de decisões do processo de projeto com suas iterações	46
Figura 2.15 Modalidades de avaliação de projeto: multicritério e em vários níveis _____	49
Figura 2.16 Representação simbólica de modelo não digital de projeto _____	54
Figura 2.17 Tipo de ligação e interação _____	55
Figura 2.18 Representações usadas no Modelo CAD Descritivo _____	56
Figura 2.19 Representações utilizadas por Frank Gehry para o projeto do Walt Disney Concert Hall	57
Figura 2.20 Exemplos de projetos usando o Modelo CAD para Avaliação _____	57
Figura 2.21 Técnicas de modelagem paramétrica na geração da forma do Museu Mercedes-Benz, Stuttgart _____	59
Figura 2.22 Técnica de animação utilizada no projeto do Pavilhão da BMW para mostra internacional de motores – Frankfurt 2001 _____	59

Figura 2. 23 Exemplos de gramática da forma em trabalhos de alunos (Terry Knight, Escola de arquitetura e planejamento, MIT)	60
Figura 2. 24 Exemplos de usos de projetos que usaram métodos baseados em Modelo Evolucionário	61
Figura 2.25 Exemplos de uso do modelo de simulação baseada no desempenho	62
Figura 2.26 Exemplos de uso de modelos de geração baseado no desempenho	62
Figura 3.1 Diagrama que sintetiza a convergência entre forma e função num contexto de projeto	75
Figura 3.2 A arquitetura performativa usa o espaço urbano como palco para encenação	76
Figura 3.3 A arquitetura como movimento	77
Figura 3.4 Arquitetura potencializador do espaço urbano	77
Figura 3.5 Representação simbólica do Modelo CAD para Avaliação	81
Figura 3.6 Representação simbólica do modelo performativo baseado na otimização	87
Figura 3.7 Representação simbólica do Modelo Performativo Baseado na Geração	89
Figura 3.8 Modelo do diagrama SPEAR	92
Figura 3.9 Visão da tela do Phoenix ModelCenter, com estrutura de análise multidisciplinar para o DesignLink	95
Figura 3.10 Tela principal do DesignLink: apresentação do diagrama multidisciplinar e outras informações gerais de projeto	95
Figura 3.11 Tela principal do DesignLink: avaliação de soluções estruturais	96
Figura 3.12 Quadro comparativo de variações paramétricas de um modelo gerado no GC e seus impactos na estrutura, avaliado no Strand, e no ganho solar, avaliado no Ecotect	97
Figura 3.13 Exemplo de projeto desenvolvido sob uma abordagem morfoecológica	98
Figura 4.1 Níveis de maturidade BIM	104
Figura 4.2 Atributos parametrizados em projeto de edifício	108
Figura 4.3 Alterações em alguns parâmetros resultam em mudanças nos padrões de proporção do edifício	109
Figura 4.4 Modelos para combinações paramétricas	109
Figura 4.5 Modelo paramétrico híbrido	110
Figura 4.6 Interferência rígida entre objetos	113
Figura 4.7 Interferência branda entre objetos	113
Figura 4.8 Receitas, métodos e recursos associados aos componentes de construção	115
Figura 4.9 Modelo integrado de informação do edifício	115
Figura 4.10 Aplicativos de autoria BIM para arquitetura	117
Figura 4.11 Áreas de interesse que podem estar integradas no modelo BIM	120
Figura 4.12 Forma de integração dos membros da equipe durante as fases de um projeto tradicional	123
Figura 4.13 Forma de integração dos membros da equipe durante as fases de um projeto integrado	124
Figura 4.14 Modelo de processo de projeto que integra ferramentas de avaliação e otimização	130

Figura 4.15 Mapa mostrando ângulo e direção da rotação dos componentes (quadro esquerdo) e tipo de material (quadro direito) usados na fachada do Condomínio Residencial 100 _____	131
Figura 4.16 Tipos de análises efetuadas no modelo do edifício: validação espacial, avaliação de conectividade de espaços, análises energéticas e estimativas de custos _____	132
Figura 5.1 Ambiente híbrido entre teoria e estudo da prática utilizado na tese _____	136
Figura 5.2 Fases do projeto abordadas nos estudos de caso _____	150
Figura 5.3 Exemplo de princípio é a geração de uma forma que é resultado da materialização da corrente de ar quando desvia-se de um objeto _____	154
Figura 5.4 Um exemplo de geometria básica é quando num prisma de base quadrada são aplicadas regras se transformando num volume com forma geométrica bem diferente da geometria inicial _____	154
Figura 5.5 Um exemplo de partido é quando uma forma geométrica passa por alterações visando melhorar o desempenho da sua geometria _____	155
Figura 5.6 Exemplo de geometria concebida como Geometria de Matemática Básica _____	156
Figura 5.7 Exemplo de geometria concebida como Geometria Matemática Simples _____	156
Figura 5.8 Exemplo de geometria concebida como Encontrar a Forma _____	157
Figura 5.9 Exemplo de geometria concebida como Forma Livre _____	157
Figura 5.10 Um exemplo de geometria concebida como Abordagem Híbrida _____	157
Figura 5.11 Imagens do Museu do Louvre Abu Dhabi _____	164
Figura 5.12 Vistas externas e internas do Museu do Louvre Abu Dhabi _____	165
Figura 5.13 Imagens dos dois sistemas arquitetônicos _____	166
Figura 5.14 Geometria da tecelagem proposta por Jean Nouvel _____	167
Figura 5.15 Composição da estrutura da cúpula _____	167
Figura 5.16 Arquiteto Jean Nouvel estudando a incidência da luz por meio de Mock Up na escala 1/1170	
Figura 5.17 Estudos de otimização da cúpula _____	171
Figura 5.18 Modelo de integração e colaboração entre as equipes de projeto _____	172
Figura 5.19 Processo de geração da forma, da forma inicial (vermelha) à solução (verde) _____	175
Figura 5.20 Modelos de projeto digital utilizados no projeto da Cúpula do Museu Abu Dhabi ____	176
Figura 5.21 Implantação da extensão da Hochschule für Techni, Stuttgart, 2009 _____	179
Figura 5.22 Vistas volume externo (a) e distribuição dos espaços interna _____	180
Figura 5.23 Níveis de estruturas geométricas do edifício _____	181
Figura 5.24 Modelo de colaboração descrito por Wallisser _____	184
Figura 5.25 Principais definições da forma _____	185
Figura 5.26 Processo de geração da forma, com indicação da forma inicial, os estágios e a solução _	187
Figura 5.27 Modelos de projeto digital utilizados na geração da forma do edifício _____	188
Figura 5.28 Imagens internas do SICE _____	191
Figura 5.29 Detalhes do projeto do SICE _____	192

Figura 5.30 Esquema de colaboração e interoperabilidade empregado no projeto do SICE _____	197
Figura 5.31 Evolução do processo de projeto _____	198
Figura 5.32 Processo de geração da forma com indicação do início do processo e solução _____	201
Figura 5.33 Modelos de projeto digital utilizados no projeto da Cobertura SICE _____	202
Figura 5.34 Vistas do Rolex Learning Center _____	205
Figura 5.35 Distribuição das Camadas do Rolex Learning Center _____	206
Figura 5.36 Estreita colaboração entre as disciplinas de arquitetura, engenharia e construção/ fabricação _____	211
Figura 5.37 O coeficiente sensível foca transição da energia de deformação durante a transformação de um nó (P), considerando uma estrutura composta por "n" elementos _____	212
Figura 5.38 Maquete do partido arquitetônico do Rolex Learning Center apresentado pelo escritório SANAA ao escritório Bollinger + Grohmann _____	214
Figura 5.39 Processo de transformação da forma usado no Rolex Learning Center _____	216
Figura 5.40 Uso de Método de Análise Finita, reduzindo: a, c) superfície original; b, d) superfície melhorada. _____	216
Figura 5.41 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma do edifício _____	217
Figura 5.42 Imagens da Torre Eiffel com a inserção do novo edifício no primeiro piso _____	220
Figura 5.43 Imagens do primeiro pavimento da Torre Eiffel _____	221
Figura 5.44 Vista interna dos blocos _____	221
Figura 5.45 Processo de geração da forma das fachadas do PPTE _____	228
Figura 5.46 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma das fachadas do PPTE _____	229
Figura 5.47 Vistas externas QNCC _____	232
Figura 5.48 Vistas da entrada do Sidra Trees (QNCC) _____	232
Figura 5.49 Vistas internas do Sidra Trees (QNCC) _____	233
Figura 5.50 Construção da Sidra Trees (QNCC) _____	233
Figura 5.51 Croquis realizados por Sasaki que descrevem as principais forças presentes na estrutura do Florence New Station e da entrada principal do QNCC _____	238
Figura 5.52 Os passos evolucionários usados na geração da forma Entrada Principal do QNCC _____	239
Figura 5.53 A geometria básica, passo 1, usada no processo evolucionário Entrada Principal do QNCC e a forma resultante representando o passo 12 _____	240
Figura 5.54 Processo de geração da forma, indicando a forma inicial e a solução do projeto _____	241
Figura 5.55 Visualização da avaliação da estrutura da Sidra Trees para posterior otimização (QNCC) _____	242
Figura 5.56 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma da Entrada do QNCC _____	242
Figura 5.57 Modelos de projeto digital _____	262
Figura 6.1 Esquema geral de concepção arquitetônica em projetos baseados no modelo performativo _____	270

Figura 6.2 Mapas de sequências de decisão: a) mapa generalizado de sequência de decisão b) mapa de sequência de decisão proposto por Lawson (2005).	271
Figura 6.3 Exemplos de possíveis fluxos de informação nas fases de uma sequência de decisão.	272
Figura 6.4 Modelos de processo de projeto	273
Figura 6.5 Modelo alternativo de processo de projeto digital	274
Figura 6.6 Mapa de sequência de decisão composto pela análise, síntese, avaliação e comunicação	275
Figura 6.7 O mapa de sequência de decisão(a) serviu como base para formular uma representação simbólica de modelo de projeto digital (b)	276
Figura 6.8 Estrutura do modelo simbólico com indicação dos tipos de ligação, classes de interação e possíveis maneiras de organizar os tipos de interação nos modelos simbólicos	278
Figura 6.9 Classes e subclasses de modelos de projeto digital propostos por Oxman (2006)	279
Figura 6.10 Modelos simbólicos identificados nos estudos de caso	280
Figura 6.11 Modelo performativo de processo de projeto digital	283
Figura 6.12 Fluxos de informação de projeto: analógico (em azul) e digital (em vermelho)	284
Figura 6.13 Fluxo de informação analógica: a) entre projetistas e componentes do projeto digital; b) entre projetistas.	284
Figura 6.14 Fluxo da informação digital entre equipes de projeto	285
Figura 6.15 Fluxo da informação digital entre componentes do projeto digital	286
Figura 6.16 Mapeamento do fluxo de informações no modelo de Projeto Performativo	286
Figura 6.17 Modelo conceitual de processo de projeto digital performativo	289
Figura 6.18 Modelo conceitual do processo de geração da forma da cobertura do Louvre Abu Dhabi	290
Figura 6.19 Modelo conceitual do processo de geração da forma da Extensão da Hochschule für Technik	291
Figura 6.20 Modelo conceitual do processo de geração da cobertura do Smithsonian Courtyard Enclosure	291
Figura 6.21 Modelo conceitual do processo de geração da forma do Rolex Learning Centre (EPFL)	292
Figura 6.22 Modelo conceitual do processo de geração da forma do Primeiro Piso da Torre Eiffel	292
Figura 6.23 Modelo conceitual do processo de geração da forma da Sidra Trees do Qatar National Convention Center	293
Figura 6.24 Síntese do mapeamento dos modelos conceituais de processo de geração da forma dos seis estudos de casos. Em cada caso é destacado o modelo simbólico que caracteriza o modelo de projeto digital	294
Figura 6.25 Modelos de projeto digital baseados no desempenho	298
Figura 6.26 Representação esquemática do uso de múltiplos modelos de projeto digital durante a geração da forma das partes do edifício	300
Figura 7.1 Fotos da Aula 1 realizada em 9 de setembro de 2011	308
Figura 7.2 Fotos da Aula 2 e 3 realizadas em 16 e 23 de setembro de 2011	308
Figura 7.3 Processo de geração da forma usando o Método BESO	310

Figura 7.4 Categorias de avaliações de desempenho contempladas em experiências de disciplinas do curso de arquitetura e urbanismo _____	313
Figura 7.5 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011 (Equipe 2, Aula 1) ____	324
Figura 7.6 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011 (Equipe 4, Aula 1) ____	326
Figura 7.7 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011 _____	329
Figura 7.8 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011 _____	330
Figura 7.9 Formas estudadas no BESO na aula de 23 de setembro de 2011 (Equipe 2) _____	335
Figura 7.10 Figuras geradas no BESO por meio de prismas de bases retangulares (Equipe 4, Aula 3) _____	338
Figura 7.11 Processo de projeto intercalando atividades automatizadas (a) e manuais (b) _____	339
Figura 7.12 Volumetria do edifício definida na Aula 1 _____	340
Figura 7.13 Formas geradas no BESO na aula de 23 de setembro de 2011 _____	342
Figura 7.14 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma pela Equipe 2 ____	347
Figura 7.15 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma pela Equipe 4 ____	348
Figura 7.16 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma pela Equipe 5 ____	349
Figura 7.17 Proposta final de implantação conjunto, com destaque para volume branco do café (Equipe 2). _____	349
Figura 7.18 Perspectivas do novo bloco proposto e volume do café em destaque (Equipe 2) _____	350
Figura 7.19 Formas geradas no BESO foram usadas como invólucro do edifício (Equipe 4) _____	352
Figura 7.20 Proposta da forma do novo edifício _____	354
Figura 7.21 Vista do novo edifício e sua articulação com demais blocos _____	355
Figura 7.22 Proposta de implantação com destaque para novo edifício com forma gerada no BESO _____	355
Figura 7.23 Processo de concepção da forma usando o BESO _____	360
Figura 7. 24 Processo de projeto usando o software BESO3D para Rhinoceros _____	362
Figura 7.25 Representação da estrutura conceitual de modelo performativo usado pelos alunos ____	362
Figura 8.1 A coexistência de diferentes modelos de projeto digital durante o processo de projeto de um edifício _____	376
Figura 8.2 Quadro síntese da pesquisa _____	379

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 Lista inicial de projetos a serem estudados _____	141
Quadro 5.2 Lista inicial com o nome dos possíveis projetos e escritórios de arquitetura e de engenharia _____	142
Quadro 5.3 Lista de projetos e escritórios de projeto _____	143
Quadro 5.4 Lista resumida com os seis projetos e cinco escritórios a serem visitados _____	144
Quadro 5.5 Lista com a identificação e descrição dos estudos de caso _____	145
Quadro 5.6 Perfil dos escritórios visitados nos estudos de caso _____	146
Quadro 5.7 Entrevistados nos estudos de caso _____	146
Quadro 5.8 Situação dos projetos estudados nos estudos de caso _____	147
Quadro 5.9 Perfil dos escritórios envolvidos na concepção dos projetos dos estudos de caso _____	151
Quadro 5.10 Perfil dos escritórios estudados _____	152
Quadro 5.11 Principais forças quantificáveis e não quantificáveis usadas em projeto _____	158
Quadro 5.12 Informações técnicas do Museu Louvre Abu Dhabi _____	163
Quadro 5.13 Características da geometria da cúpula _____	168
Quadro 5.14 Forças-guia no processo de geração da forma da cúpula _____	168
Quadro 5.15 Técnicas utilizadas na geração da forma da cúpula _____	169
Quadro 5.16 Software utilizados na fase de concepção da forma da cúpula _____	171
Quadro 5.17 Informações técnicas da Extensão da Hochschule für Technik _____	177
Quadro 5.18 Características da geometria do edifício _____	181
Quadro 5.19 Forças-guia no processo de geração da forma do edifício _____	182
Quadro 5.20 Técnicas digitais utilizadas na geração da forma do edifício _____	182
Quadro 5.21 Softwares utilizados na geração da forma do edifício _____	183
Quadro 5.22 Informações técnicas do projeto _____	190
Quadro 5.23 Características da geometria da cobertura _____	193
Quadro 5.24 Forças usadas na otimização da forma da cobertura _____	194
Quadro 5.25 Técnicas, estágios do ciclo de decisão e loops reiterativos _____	194

Quadro 5.26 Softwares, estágios do ciclo de decisão e habilidades requeridas _____	195
Quadro 5.27 Informações técnicas sobre o projeto _____	204
Quadro 5.28 Características da geometria do edifício _____	207
Quadro 5.29 Forças-guia no processo transformação da forma do edifício _____	207
Quadro 5.30 Técnicas, estágios do ciclo de decisão e estágio em que o loop interage _____	208
Quadro 5.31 Software utilizados na fase de transformação da forma _____	209
Quadro 5.32 Informações técnicas do Projeto do Primeiro Piso da Torre Eiffel _____	219
Quadro 5.33 Características da geometria das fachadas do PPTE _____	223
Quadro 5.34 Forças-guia no processo de geração da forma da fachada _____	223
Quadro 5.35 Técnicas utilizadas na otimização da forma _____	224
Quadro 5.36 Softwares utilizados na geração da forma da fachada _____	225
Quadro 5.37 Informações técnicas do projeto _____	231
Quadro 5.38 Características da geometria usada na geração da forma _____	234
Quadro 5.39 Forças-guia no processo de geração da forma _____	234
Quadro 5.40 Técnicas utilizadas na geração da forma da Sidra Trees (QNCC) _____	235
Quadro 5.41 Perfil do uso e porte dos estudos de caso _____	244
Quadro 5.42 Escalas de uso dos modelos performativos para geração da forma do edifício _____	245
Quadro 5.43 Comparativo das categorias geométricas usadas na geração da forma _____	246
Quadro 5.44 Principais forças usadas na geração da forma _____	247
Quadro 5.45 Perfil das forças utilizadas nos modelos performativos _____	248
Quadro 5.46 Principais técnicas usadas no processo de geração da forma digital _____	250
Quadro 5.47 Relação de softwares mais utilizados no processo de geração da forma _____	251
Quadro 5.48 Perfil da interoperabilidade nos estudos de caso _____	253
Quadro 5.49 Perfil da colaboração _____	254
Quadro 5.50 Modelos de projetos digital identificados nos estudos de caso _____	256
Quadro 5.51 Categorias presentes nos métodos estudados nos estudos de caso _____	258
Quadro 5.52 Classificação dos modelos performativos por meio das características dos métodos _____	260
Quadro 5.53 Classificação dos modelos performativos proposta por este trabalho _____	261
Quadro 6.1 Diferenças entre Modelos Performativos e CAD para Avaliação _____	301
Quadro 7.1 Plano experimental da pesquisa _____	305
Quadro 7.2 Quadro de áreas existentes e estimadas, projeto arquitetônico LaCTAD _____	307
Quadro 7.3 Nível de experiência dos estudantes em softwares de representação, de avaliação e de autoria BIM: número total de alunos (turma) e por equipe _____	311
Quadro 7.4 Plano experimental da pesquisa revisado _____	313
Quadro 7.5 Quadro síntese das atividades, análises, técnicas, local e duração dos experimentos _____	314

Quadro 7.6 Categorias de ações cognitivas usadas nas análises de protocolo_____	319
Quadro 7.7 Critérios de avaliação do produto _____	320
Quadro 7.8 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 2, Aula 1) ___	323
Quadro 7.9 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 4, Aula 1) ___	326
Quadro 7.10 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 5, aula 1) _	328
Quadro 7.11 Número e categorias físicas das tarefas realizadas em cada Segmento na Aula 1 _____	331
Quadro 7.12 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 2, Aula 3) ___	333
Quadro 7.13 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 4, Aula 3) ___	337
Quadro 7.14 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 5, aula 3) _	341
Quadro 7.15 Número e categorias físicas das tarefas realizadas em cada Segmento na Aula 3 _____	343
Quadro 7.16 Forma inicial e categorias geométricas usadas na geração da forma _____	344
Quadro 7.17 Número de iterações e principais forças usadas na geração da forma_____	345
Quadro 7.18 Principais técnicas digitais usadas durante a geração da forma _____	346
Quadro 7.19 Softwares usados pelas equipes durante o processo de geração da forma digital _____	346
Quadro 7.20 Média das notas dos juízes para a proposta apresentada pela Equipe 2 _____	351
Quadro 7.21 Média das notas dos juízes para a proposta apresentada pela Equipe 4 _____	353
Quadro 7.22 Média das notas dos juízes para a proposta apresentada pela Equipe 5 _____	354
Quadro 7.23 Número de tarefas realizadas em cada segmento (S) das aulas 1 e 3, por equipe (E) _	356

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AECO	Arquitetura Engenharia e Construção e Operação
BIM	Building Information Modeling
ISO	International Organization for Standardization
OPS	ONUMA Planning System
GA	Algoritmo Genético
ANN	Artificial Neural Network
CAD	Computer Aided Design/ Computer Aided Drawing/ Dradting
PC	Computadores Pessoais
OOCAD	CAD Orientando ao Objeto
NURBS	Nonuniform Rational B-Splines
LOG	Level of Granularity
IFC	Industry Foundation Classes
IFD	Information Framework for Dictionary
IDM	Information Delivery Manual
IAI	International Alliance for Interoperability
MVD	Modelo View Definition

XML	Extensible Markup Language
AecXML	Architecture, Engineering and Construction XML
gbXML	Green Building XML
ifcXML	Industry Foundation Classes XML
TIC	Tecnologia da Informação e comunicação
FEC	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
UNICAMP	Universidade de Campinas
FDE	Fundação para o Desenvolvimento da Educação
DML	Depósito de Material de Limpeza
ESC	Environmental Simulation Center
GSA	General Services Administration
NIBS	National Institute of Building Sciences
AIA	American Institute of Architects
DAD	Digital Architectural Design
IA	Artificial Intelligence
CBR	<i>Case-based Reasoning</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Problemática	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Hipótese	5
1.4	Metodologia	6
1.5	Inspirações e Referências	7
1.6	Estrutura do Trabalho	8
2	PROJETO ARQUITETÔNICO DIGITAL	9
2.1	O Processo de Projeto Arquitetônico	9
2.1.1	Características do processo de projeto arquitetônico	9
2.1.2	Os estudos em métodos de projeto	12
2.1.3	As fases do processo de projeto arquitetônico	19
2.1.4	Atividades e habilidades requeridas no projeto arquitetônico	23
2.2	Evolução do uso do Computador no Projeto Arquitetônico	25
2.3	Computador no Projeto Arquitetônico	29
2.3.1	O uso do computador no programa arquitetônico	29
2.3.2	O uso do computador na concepção do projeto arquitetônico	30
2.3.3	O uso do computador na avaliação/ previsão do projeto arquitetônico	46
2.4	Os Modelos de Projetos Arquitetônicos Digitais	52
2.4.1	Modelo CAD	55
2.4.2	Modelo de formação	58
2.4.3	Modelo generativo	60
2.4.4	Modelo de desempenho	61
2.4.5	Modelo composto	63
2.4.6	Considerações sobre os modelos	63

2.5 O Novo Estruturalismo e as Mudanças no Processo de Projeto de Arquitetura e Engenharia	64
2.5.1 Forma, força e estrutura	64
2.5.2 Forma, força e desempenho	66
2.5.3 Material, estrutura e forma: novo estruturalismo	67
2.5.4 Da forma para a matéria	71
2.6 Considerações Finais	72
3 PROJETO DIGITAL BASEADO NO DESEMPENHO	73
3.1 Introdução	73
3.2 O Desempenho	73
3.3 Arquitetura Performativa x Projeto Baseado no Desempenho	76
3.3.1 Arquitetura performativa	76
3.3.2 Projeto baseado no desempenho	78
3.4 Modelos de Projeto Digital Baseados no Desempenho	79
3.4.1 Modelo de CAD para Avaliação	79
3.4.2 Modelo performativo	83
3.5 Projeto Digital Baseado em Múltiplos Desempenhos	89
3.5.1 Múltiplo desempenho e análise de decisão de multicritério	90
3.5.2 Abordagem “morfoecológica” baseada em múltiplos desempenhos	97
3.5.3 Limitação dos métodos baseados em múltiplo desempenho	99
3.6 Projeto Performativo e Mudanças no Processo de Projeto de Arquitetura	100
4 BIM E O PROCESSO DE PROJETO DIGITAL	101
4.1 Considerações Gerais Sobre o BIM	101
4.2 O Desenvolvimento do BIM na AECO	103
4.3 A Modelagem Paramétrica	106
4.3.1 Modelos, projetos e objetos paramétricos	107
4.3.2 Sistemas de base de conhecimento e modelagem paramétrica	110
4.3.3 Capacidades de um modelo paramétrico	112
4.3.4 Características de um objeto paramétrico	113
4.3.5 Modelagem Paramétrica em projeto de arquitetura	116
4.4 Interoperabilidade	117
4.4.1 A interoperabilidade na AEC	117
4.4.2 A extensão da interoperabilidade com o BIM	118
4.4.3 Interoperabilidade e formatos de trocas de arquivos digitais	120
4.4.4 Interoperabilidade por meio dos portais BIM Web	122

4.5 O Processo de Projeto de Arquitetura com o BIM	123
4.5.1 O projeto integrado e o BIM	123
4.5.2 Revisão do processo de projeto arquitetônico com o BIM	125
4.5.3 Avaliação de soluções arquitetônicas com o BIM	127
4.5.4 Concepção da forma arquitetônica com o BIM	129
4.6 Considerações Finais	132
5 A PRÁTICA DO PROJETO DIGITAL PERFORMATIVO: Estudos de caso	135
5.1 A Formulação dos Estudos de Caso	135
5.1.1 Estrutura conceitual e objetivos	135
5.2 A Delimitação das Unidades-Caso e Formas de Coleta de Dados	138
5.2.1 Amplitude das unidades-caso	138
5.2.2 Delimitação das unidades-caso	139
5.2.3 Identificação das unidades-caso	145
5.2.4 Coleta de dados	147
5.3 Protocolos e Processos de Análises	149
5.3.1 Escritório	150
5.3.2 Perfil do projeto	153
5.3.3 A geração da forma	153
5.4 Estudos de Caso	161
5.4.1 ESTUDO DE CASO 1: Museu Louvre Abu Dhabi	162
5.4.2 ESTUDO DE CASO 2: extensão da Hochschule für Technik (HfT)	177
5.4.3 ESTUDO DE CASO 3: Smithsonian Institution Courtyard Enclosure	189
5.4.4 ESTUDO DE CASO 4: Rolex Learning Center, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL)	203
5.4.5 ESTUDO DE CASO 5: primeiro piso da Torre Eiffel	218
5.4.6 ESTUDO DE CASO 6: Sidra Trees, Qatar National Convention Centre	230
5.5 Análise e Discussões	243
5.5.1 Comparações das unidades-caso	243
5.6 Discussão Final	262
6 MODELO PERFORMATIVO: Estrutura Conceitual	265
6.1 Introdução	265
6.2 Geração Digital da Forma e espaço de soluções	266
6.3 Modelos de Projeto Digital	270
6.3.1 Processo de projeto e sequência de decisões	271
6.3.2 Sequência de decisões e modelo digital	274

6.3.3 Modelos de projeto digital _____	277
6.3.4 Modelos de projeto digital performativo _____	279
6.4 Estrutura Conceitual dos Modelos Performativos _____	282
6.4.1 Múltiplas representações simbólicas do modelo performativo _____	282
6.4.2 Fluxo da informação _____	283
6.4.3 Representação da estrutural conceitual _____	288
6.4.4 Estrutura conceitual nos estudos de casos _____	290
6.5 Considerações sobre a Estrutura Conceitual _____	294
6.6 Múltiplos Modelos: uma abordagem baseada no desempenho _____	297
6.6.1 Instâncias do conceito de desempenho aplicado ao projeto _____	297
6.6.2 Múltiplos métodos: visões diferenciadas de desempenho _____	298
6.6.3 Múltiplos métodos: domínios formais X sistemas de conhecimento _____	300
6.7 Considerações _____	301
7 PROJETO PERFORMATIVO: no atelier de projeto _____	303
7.1 Problema e Hipótese _____	303
7.2 A Pesquisa Experimental _____	305
7.2.1 Plano experimental da pesquisa _____	305
7.2.2 Determinação do experimento: atividades desenvolvidas _____	306
7.2.3 Determinação dos sujeitos _____	310
7.2.4 Revisão da população estudada _____	313
7.2.5 Determinação do ambiente _____	314
7.2.6 Procedimentos de análise e interpretação dos dados _____	315
7.2.7 Coletas de dados _____	321
7.3 Análises dos Experimentos _____	321
7.3.1 Categorização e descrição _____	321
7.3.2 Processos de projeto: Aula 1 _____	322
7.3.3 Processos de projeto: Aula 3 _____	332
7.3.4 Processos de projeto: Geometria e forças _____	344
7.3.5 Processos de projeto: técnicas e softwares _____	345
7.3.6 Processos de projeto: modelo digital e nível de automatização _____	347
7.3.7 Análise dos produtos _____	349
7.4 Interpretações, Análises e Descobertas _____	356
7.4.1 Análise dos resultados das ações cognitivas e segmentações _____	356
7.4.2 Ações cognitivas dominantes _____	357
7.4.3 Análise das avaliações dos produtos _____	358

7.5 Considerações Finais	359
7.5.1 Os resultados da experiência	359
7.5.2 Limitações do método implementado	363
7.5.3 Limitações do experimento	363
8 CONCLUSÕES	365
8.1 Introdução	365
8.2 Validação das Questões Postuladas neste Trabalho	366
8.3 Validação das Hipóteses da Pesquisa	370
8.4 Confirmação dos Objetivos da Pesquisa	372
8.5 Resultados	373
8.5.1 Resultados da estrutura conceitual	374
8.5.2 Resultados da aplicação do modelo performativo em ateliê de projeto	377
8.6 Contribuições e Originalidade	378
8.7 Síntese	379
8.8 Limitações e Dificuldades	380
8.9 Trabalhos Futuros	380
REFERÊNCIAS	383
APÊNDICES	397
Apêndice A - Questionário aplicado durante as entrevistas aos escritórios visitados	399
Apêndice B - Segmentos dos protocolos visuais	411
Apêndice C - Questionário Q1 - aplicado aos alunos da disciplina AU 120	421
Apêndice D - Questionário Q2 - aplicado aos alunos da disciplina AU 120	425
Apêndice E - Questionário Q3 - aplicado aos alunos da disciplina AU 120	429
Apêndice F - Entrevista - aos alunos da disciplina AU 120 após a realização da experiência didática	433

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemática

O desenvolvimento de tecnologias baseadas na modelagem paramétrica, na interoperabilidade e na fabricação digital tem possibilitado mudanças significativas nos paradigmas de processo de projeto consolidados na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). Do ponto de vista do projeto arquitetônico, essas mudanças estão mais associadas ao conceito de informatização (*Computerization*) do que ao de computação (*Computation*). A informatização é entendida como o ato de entrada, processamento ou armazenamento de informações em um sistema computacional. Relaciona-se com a digitalização de entidades ou processos que são preconcebidos, predeterminados e bem definidos (TERZIDIS, 2007).

A computação é a utilização de procedimentos de cálculos determinado por matemática ou métodos lógicos para geração de soluções. Relaciona-se com a automatização, mecanização, digitalização e conversão (TERZIDIS, 2007). A informatização usa tecnologias que nem sempre atuam diretamente nos métodos de resolução de sínteses arquitetônicas. Exploram pouco as estruturas digitais dos processos de projetos arquitetônicos.

Na prática, observa-se que muitas dessas tecnologias digitais, algumas das quais associadas ao conceito do *Building Information Modeling* (BIM), estão voltadas para o desenvolvimento de processos de gerenciamento e gestão de informação de projeto. Elas resultam em mudanças no meio de representação, transmissão e gerenciamento de informação do edifício, todavia, contribuem pouco para reformulações dos processos de geração da forma

arquitetônica e, como consequência, interferem pouco na qualidade da arquitetura. O resultado é que o deslumbramento com o uso dessas tecnologias não traz melhorias significativas para a mudança da práxis arquitetônica se for pensada apenas como informatização (KALAY, 2006).

Por outro lado, no campo dos processos de projeto em arquitetura, observa-se, nestas últimas décadas, uma diversificada gama de experimentações em novos métodos de projeto digital (STEELE, 2001; KOLAREVIC, 2003; KOLAREVIC, MALKAWI, 2005; OXMAN, 2006, 2007, 2008a, 2008b; TESSMANN, 2008). As primeiras gerações, que reportam ao fim dos anos 1980, usavam processos de projeto ainda fragmentados, vinculados a estratégias de composição da forma, com implementações ainda em nível de práticas formalistas (OXMAN, 2006). Só a partir dos anos 1990, experiências trouxeram mudanças efetivas nos conceitos e na maneira como os projetistas representavam, avaliavam e geravam a forma arquitetônica, usando o meio digital (KOLAREVIC, 2003). Essas experiências, que trouxeram profundas mudanças nos processos de projeto tradicionais, passaram a investigar a materialização usando o meio digital e o desempenho da forma.

A difusão das tecnologias digitais e das experimentações em métodos de projeto levou a novas abordagens em projeto digital. Conceitos como não repetitivo, evolucionário, arquitetura topológica, diferenciação, hiper-superfície, arquitetura *blob*, etc., passam a fazer parte do conhecimento arquitetônico (OXMAN, 2008a).

Paulatinamente, alguns novos métodos em projeto arquitetônico digital passaram a usar o *Building Information Modeling*, não apenas como meio de armazenar e gerenciar conhecimentos do edifício, mas também contribuindo para a transformação e a geração de novas soluções de projeto (EASTMAN *et al.*, 2011). Métodos de projeto digital baseados no desempenho, por exemplo, aparecem, a partir dos anos 1990, como resultado de experimentações em uma área nova e intrigante da prática de projeto (KOLAREVIC, 2003; KOLAREVIC, MALKAWI, 2005). Esses métodos utilizam informatização aliada à computação como meio de transformação da arquitetura digital sob as bases do desempenho.

Desenvolvimentos tecnológicos e metodológicos nos anos recentes têm permitido a mudança do foco do projeto digital, valorizando o desempenho como uma questão fundamental do processo de projeto. Métodos digitais que utilizam processos automatizados de avaliação do

desempenho da edificação,¹ ou métodos que usam o desempenho como motor de transformação ou geração da forma,² vêm paulatinamente sendo introduzidos no cenário internacional como promissoras práxis em projeto digital. Estas visam incorporar o desempenho na avaliação, otimização e geração da forma arquitetônica já nas etapas iniciais do processo de projeto; de modo a contribuir para a melhoria da eficiência do projeto.

Essas transformações da prática com incorporação do desempenho como instrumento aliado ao processo de projeto digital implicam alterações no modo como os projetistas agem e se relacionam. Acredita-se que as práticas de projeto digital baseadas no desempenho, ao contrário de limitar o potencial criativo do projetista, como acreditam aqueles que têm restrição ao uso do computador no processo de projeto (STEELE, 2001; LAWSON, 2004), podem expandir as possibilidades de solução, melhorar a eficiência e resultar em soluções sustentáveis (KRYGIEL; NIES, 2007).

Dentro do universo dos projetos digitais baseados no desempenho, existe uma categoria bastante promissora de métodos de projetos digitais, que usa o desempenho não apenas como meios avaliativos, mas, acima de tudo, como instrumento de transformação das ideias e conceitos em matéria e forma arquitetônica. Para isso, usa mecanismos digitais que incorporam princípios de informatização a estruturas computacionais. É essa categoria de projeto digital, classificada por Oxman (2007, 2008a) como Projeto Performativo, que será investigada neste trabalho.

Nesse cenário discutido acima, uma série de questões foram formuladas. Espera-se que, ao longo deste trabalho, sejam respondidas, confirmadas ou negadas:

- Será que o projeto performativo implica um redirecionamento das ações projetuais dos projetistas, que abdicam, em determinados estágios de tomadas de decisão, de uma interação direta com uma representação do projeto, gerando a forma arquitetônica, para interagir com partes interativas de mecanismos que geram a forma?

¹ Métodos baseados num modelo de projeto digital denominados neste trabalho de Modelo CAD para Avaliação.

² Esses métodos baseiam-se num modelo de projeto digital denominado neste trabalho de Modelos Performativos.

- Os projetistas necessitam mudar suas estruturas cognitivas e incorporarem novas habilidades?
- Práticas performativas reduzem o poder das ações dos projetistas sobre as decisões projetuais?
- O desenvolvimento de técnicas digitais, de modo colaborativo, para a geração/otimização da forma baseada no desempenho pode indicar, em mudança da autoria do projeto, que passa a ser das equipes de arquitetura e engenharia?
- As práticas de projeto baseadas no modelo performativo são viáveis de serem implementadas dentro do estágio tecnológico atual?
- A incorporação, já na etapa de concepção arquitetônica, de informações e de conhecimentos vinculados às tecnologias digitais de modelagem paramétrica e à interoperabilidade são condições para práticas digitais baseadas no desempenho?
- Essas práticas podem contribuir com a melhoria do desempenho das soluções arquitetônicas?

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral: formular uma Estrutura Conceitual de processo de projeto digital que explique a prática de projeto digital no contexto da Arquitetura Performativa.

Acredita-se que a formulação de estrutura conceitual de modelo teórico de processo de projeto performativo poderá servir como meio para identificar os fluxos de informação, as atribuições, as tecnologias, os papéis para os projetistas, as habilidades que devem ser requeridas na formação dos projetistas, os conhecimentos e repertórios necessários.

Destacam-se como objetivos específicos:

- Caracterizar a prática do projeto digital baseados em desempenho de acordo com as categorias de ações (processos) e decisões (sínteses) empregadas nos processos de projeto.

- Identificar métodos, técnicas e ferramentas empregados na prática de projeto performativo.
- Categorizar os modelos performativos.
- Identificar e caracterizar os principais componentes desses modelos.
- Relacionar projeto performativo e *Building Information Modeling*.
- Propor estrutura conceitual de modelo de projeto performativo. Posicioná-lo perante outros modelos de projetos digitais baseados no desempenho.
- Validar a estrutura conceitual.
- Testar a exequibilidade do modelo performativo em experiência de ateliê de projeto.

1.3 Hipótese

A questão que se apresenta é: quais são os pressupostos da prática de projeto digital baseada na incorporação do desempenho como propulsor do processo de geração da forma arquitetônica?

Fundamentado nessa questão, que será abordada ao longo deste trabalho, esta pesquisa investiga duas hipóteses relacionadas.

Primeira hipótese: O modelo de projeto digital denominado de Modelo Performativo tem como pressuposto um processo de projeto automatizado, baseado na colaboração, na modelagem paramétrica e na interoperabilidade.

Segunda hipótese: É possível simular a prática de Projeto Performativo segundo esses pressupostos em experiências didáticas de atelier de projeto em cursos de graduação em Arquitetura e Urbanismo, mesmo se sabendo das limitações de conhecimento dos projetistas e da existência de práticas pouco colaborativas.

1.4 Metodologia

Para atender aos objetivos gerais e específicos e responder às hipóteses levantadas, esta pesquisa desenvolveu um processo de trabalho fundamentado em características da pesquisa exploratória e da pesquisa explicativa (GIL, 1996). A primeira iniciou-se com a busca da familiarização do problema. Realizou-se por meio de uma pesquisa bibliográfica e de estudos de caso. A segunda ocorreu pelo desenvolvimento de uma pesquisa experimental.

A pesquisa bibliográfica abordou os principais conteúdos estudados e serviu como revisão bibliográfica deste trabalho. Os temas principais para a fundamentação teórica desta pesquisa foram: processo de projeto arquitetônico digital, projeto baseado no desempenho e *Building Information Modeling*.

As principais fontes bibliográficas foram livros, teses de doutorado, dissertações de mestrado, normas nacionais e internacionais, artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais,³ anais de congressos, seminários e outros eventos nacionais e internacionais,⁴ sites na internet e entrevistas com pesquisadores e projetistas.

A etapa de pesquisa bibliográfica resultou na revisão teórica apresentada nos Capítulos 2, 3 e 4. Estes caracterizaram e descreveram os principais conceitos explorados neste trabalho.

Os estudos de caso visaram à realização de um estudo profundo e exaustivo sobre processos de geração da forma desenvolvidos em modelos performativos. Para isso, revisão bibliográfica, entrevistas e discussões com pesquisadores da área forneceram informações suficientes para a delimitação das unidades-caso que fossem mais representativas das práticas pretendidas neste trabalho. A partir daí, definiram-se e desenvolveram-se os estudos de caso.

Na etapa de pesquisa bibliográfica e de estudos de caso, o pesquisador realizou um Estágio Doutorando no Technion Institute of Technology, em Israel, sob a orientação da Professora Rivka Oxman. Nesse período, adquiriram-se novas referências bibliográficas na área

³ Building Science, Management Science, Automation in Construction, Environment and Planning B, Design Studies, Best Practices, entre outras.

⁴ Arab Society for Computer Aided Architectural Design, International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings, Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, International Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, foram alguns eventos pesquisados.

e realizaram-se diversas discussões com a Professora Rivka Oxman, com o Professor Rafael Sacks e outros pesquisadores da área visando aprofundar questões relacionadas com os modelos performativos e o *Building Information Modeling*.

A pesquisa experimental visou responder à segunda hipótese. Iniciou-se definindo um plano experimental, sujeitos e ambiente. Como a pesquisa se deu na experimentação de um método, este foi definido, caracterizado e testado no contexto do modelo performativo. Nesta pesquisa experimental, a variável manipulável consistiu no método aplicado em exercício único de projeto. Portanto, o plano experimental foi de uma variável única. Os sujeitos envolvidos foram os alunos de uma disciplina do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. A coleta de dados realizou-se por meio de registro do desenvolvimento do exercício de projeto e seus produtos. Para análise e interpretação dos dados, utilizou-se as técnicas de análise de protocolos e conteúdo. Por fim, chegou-se às principais conclusões da pesquisa experimental, as quais foram discutidas e confrontadas com as hipóteses levantadas.

1.5 Inspirações e Referências

Entre as inúmeras referências e inspirações que motivaram o desenvolvimento deste trabalho, podem-se destacar: as pesquisas da Professora Rivka Oxman (coorientadora), em projeto digital, arquitetura digital e estudos de projeto; discussões com o professor Rafael Sacks sobre *Building Information Modeling* na concepção do projeto arquitetônico; discussões com projetistas que desenvolvem projeto performativo em grandes experiências de projeto; e leituras e discussões com a Professora Regina Ruschel (orientadora) sobre livros, teses e artigos, por exemplo: Broadbent (1973); Kalay (2004); Lawson (2004); Kolarevic e Malkawi (2005); Lawson (2005); Sasaki (2005); Eastman *et al.* (2008, 2011); Hensel e Menges (2008); Tessman (2008); Huang e Xie (2010); Oxman e Oxman (2010).

1.6 Estrutura do Trabalho

Além da introdução, este trabalho constitui-se de sete capítulos.

No Capítulo 2, aborda-se o projeto arquitetônico digital. Definem-se os conceitos relacionados com o processo de projeto arquitetônico, o projeto arquitetônico digital, modelo de projeto digital e novo estruturalismo. No Capítulo 3, apresentam-se os fundamentos do projeto baseado no desempenho. Definem-se conceitos como projeto baseado no desempenho, arquitetura performativa, projeto baseado no multidesempenho e projeto performativo. Apresentam-se as classes de projeto baseadas no desempenho e discutem-se as mudanças conceituais em processo de projeto com o advento do projeto performativo.

Os principais conceitos relacionados com o *Building Information Modeling* (BIM) apresentam-se e discutem-se no Capítulo 4, assim como as duas principais tecnologias que fundamentam o BIM, discutindo-se a importância deste na avaliação de desempenho e na concepção da forma arquitetônica.

No Capítulo 5, realizam-se estudos de caso em projetos digitais concebidos na ótica dos modelos performativos. No Capítulo 6, apresenta-se a Estrutura Conceitual de Projeto Performativo, proposta neste trabalho, que permite responder à primeira hipótese desta pesquisa.

Já no Capítulo 7, apresenta-se e discute-se uma pesquisa experimental conduzida em experiência de ensino de projeto. Nessa experiência, propõe-se e aplica-se um método de projeto performativo.

Finalmente, no Capítulo 8, confrontam-se os objetivos e as hipóteses levantadas na introdução; discute-se a importância da estrutura conceitual proposta neste trabalho para a solidificação dos conhecimentos em projeto performativo. Apresentam-se algumas das principais limitações desta pesquisa e sugere-se trabalhos futuros na área.

2 PROJETO ARQUITETÔNICO DIGITAL

Este capítulo investiga o processo de projeto arquitetônico digital. Conceitua processo de projeto arquitetônico, fases do projeto e discute métodos utilizados na busca de soluções. Mostra diferenças entre o processo de projeto arquitetônico analógico e o digital. Faz um apanhado sobre os diferentes usos do computador nas fases do processo de projeto, mostrando métodos usando o meio digital e aplicativos computacionais utilizados no projeto arquitetônico. Classifica os métodos de projeto arquitetônico digital de acordo com os modelos propostos por Oxman (2006) e aborda questões relacionadas com a forma, estrutura, geometria e material. O objetivo é criar um corpo teórico capaz de dar suporte aos principais conceitos relacionados com o projeto digital, que serão abordados neste trabalho.

2.1 O Processo de Projeto Arquitetônico

2.1.1 Características do processo de projeto arquitetônico

Existem diversas maneiras de descrever o processo de projeto arquitetônico e como esse interfere na produção do edifício. Algumas são mais precisas, outras são mais vagas. O problema das descrições, segundo Broadbent (1973), é que dizem pouco sobre o que se deve saber do processo de projeto. Um dos motivos é que essas são, em geral, superficiais e abordam a criatividade como principal componente do processo de projeto, interpretando-a como uma

atividade estática. Outro problema está na complexidade e variedade do processo de projeto. Esse varia, entre outros fatores, em função da natureza do problema do projeto, do perfil do projetista, das necessidades dos clientes. Pode empregar métodos mais explícitos e sistemáticos ou subjetivos e pouco sistemáticos.

Por outro lado, autores como Vries e Wagter (1991), Barber e Hanna (2001), e Lawson (2005) mostram que o processo de projeto arquitetônico apresenta características mais ou menos comuns, que devem ser consideradas nas investigações nessa área. Segundo Vries e Wagter (1991), essas características são: processo mal estruturado, processo em aberto, não existe um ponto de partida.

Um processo de projeto arquitetônico é mal estruturado porque os problemas, na maioria, são mal definidos, ou seja, os fins e os meios das soluções são desconhecidos e externos ao problema, pelo menos no seu conjunto (ROWE, 1988). Embora as características do problema (como tempo, esforço, requisitos) possam ser claros, grande parte da atividade de resolução de problemas se dá por definições e redefinições pouco explícitas. Na impossibilidade de descrever os passos que levarão a uma solução bem-sucedida de problema de projeto, os arquitetos criam soluções e então verificam se essas resolvem o problema de projeto.

Na opinião de Rittel (1995), há problemas de projeto tão mal definidos que podem ser chamados de perniciosos. Entre as características dos problemas perniciosos estão: problemas sem uma formulação definitiva, o que o deixa em aberto para a formulação de novas questões e reformulações; a qualquer hora, uma solução pode ser proposta, ampliada ou desenvolvida; diferentes formulações do problema implicam diferentes soluções e vice-versa; soluções propostas não são necessariamente corretas ou incorretas, o que impossibilita a formulação de alternativas definitivas.

Assim, fica difícil prever soluções para resolver um problema de projeto. Apenas para pequenas partes do projeto, que apresentam número limitado de restrições, é possível chegar a soluções mais definitivas. Por outro lado, Vries e Wagter (1991) mostram que projetistas experientes têm conhecimento prévio sobre procedimentos executados em um grande número de soluções e sobre seus sucessos e fracassos. Esses podem utilizar o conhecimento na definição de novas soluções que resolvam problemas de projeto parecidos. Essa capacidade de identificar,

controlar e variar o processo de projeto é uma das principais habilidades que um projetista deve desenvolver.

O processo de projeto arquitetônico está em aberto em virtude de não se alcançar uma “solução ideal” de edifício, e, de não existir, nas fases preliminares de projeto, uma meta real de morfologia desejada (VRIES, WAGTER, 1991; LAWSON, 2005). Os projetistas iniciam o processo de projeto sem saber exatamente como será a morfologia do que eles vão projetar. Por meio da otimização de um grande número de restrições e requisitos parcialmente conflitantes, o processo de projeto evolui em busca da “solução ideal”.

Pelo fato de partir de um “problema pernicioso”, não se pode dizer que alcançou uma solução definitiva, mas sim, que pode ser sempre melhorado. Dificilmente um projetista acaba um projeto por não conseguir melhorá-lo, mas, quase sempre, por causa de um prazo final ou de uma condição do orçamento. Os projetistas definem quais as condições mais importantes e aperfeiçoam a solução, mesmo que restrições menos importantes não sejam respeitadas. A escolha das restrições mais importantes não se relaciona apenas com o problema de projeto, mas, também, com as preferências do projetista (LAWSON, 2005).

A terceira característica comum de um processo de projeto arquitetônico é que ele não tem um ponto de partida (VRIES; WAGTER, 1991). Em geral, começa-se com alguns esboços, na tentativa de dispor um edifício num sítio. O projetista estabelece algumas conjecturas de projeto (objetivos do partido, volumetria, aparência e perfil do uso), para servirem de base, e as aperfeiçoa. Depois, avalia e confirma, nega ou aponta outros caminhos para a solução.

Em vez de um ponto inicial ou um ponto final, Lawson (2005) considera que o processo de projeto é, acima de tudo, ação para mudar o ambiente de alguma forma. Assim, o contexto principal do trabalho do arquiteto está na sua ação. Para minimizar o problema de imprecisão e incompletude inerente ao processo arquitetônico, há duas técnicas muito usadas por projetistas de arquitetura: reduzir o número de requisitos para um nível aceitável, e sobrepor princípios de ordenação de projeto (VRIES; WAGTER, 1991).

A redução do número de requisitos significa que, durante as primeiras fases do processo de projeto, apenas os requisitos que influenciam as principais partes do edifício são considerados. Com a evolução do processo de projeto, os projetistas devem considerar os outros

requisitos menos importantes e mais específicos. Esses, por serem mais específicos, terão efeitos apenas pontuais no processo de projeto.

A sobreposição de princípios de ordenação visa fornecer um ponto inicial para o processo de projeto e fornecer uma série de critérios que podem ser usados para a avaliação nos estágios iniciais. Esse último aspecto tem um papel importante, pois nessa fase inicial não existem informações precisas que possam ser usadas para a avaliação das soluções propostas. O ponto inicial é expresso nas primeiras configurações arquitetônicas. Essas configurações são representadas por diagramas. O uso de diagrama é um meio de trabalhar com poucos requisitos como partes essenciais do projeto. Informações pouco relevantes num dado momento são exclusas do diagrama.

Ao limitar as partes essenciais do projeto a poucos requisitos, simples e consistentes com as ideias básicas do projeto, facilitam-se as atividades no processo de projeto. Esses requisitos guiam a geração de alternativas de projeto, dentro de um espaço de soluções, e podem ser utilizados na avaliação das soluções mais apropriadas ou que melhor satisfaçam às regras estabelecidas nesses requisitos.

Acrescidas às características descritas acima, que são mais ou menos comuns no processo de projeto arquitetônico, Lawson (2005) mostra que esse também envolve a subjetividade, o julgamento e a descoberta, por ser uma atividade prescritiva e de criação. Essas, portanto, também são características que devem ser consideradas nas investigações em processo de projeto.

2.1.2 Os estudos em métodos de projeto

A formalização dos estudos em processos de projeto, na década de 1960, com o movimento dos métodos (BROADBENT, 1973), teve forte influência de conhecimentos oriundos da engenharia, ergonomia, pesquisas operacionais, teoria da informação, cibernética, matemática e computação. Os conhecimentos dessas áreas do saber eram disponíveis para os teóricos de projeto que os utilizavam nas suas ideias. Nessa época, vários eventos marcaram a emergência dos métodos de projeto como uma disciplina nova no campo da arquitetura (BROADBENT, 1971).

Muitas das pesquisas da época ligadas aos métodos de projeto desenvolveram mapas de processos de projeto, com significativas repercussões em diferentes currículos e atividades profissionais. Esses mapas consistiam numa sequência de atividades distintas e identificáveis que ocorriam seguindo uma ordem lógica, previsível, inicialmente como uma forma de análise do projeto (LAWSON, 2005). Retratavam o progresso das atividades do projetista desde os primeiros estágios (definição do problema) até os estágios finais (com a solução).

As pesquisas em métodos de projeto possibilitaram compreender melhor alguns modelos mentais de projeto dos arquitetos, e desenvolver métodos que permitiam aprofundar as pesquisas em cada um dos estágios do processo de projeto. O objetivo dos novos métodos era exteriorizar o processo de projeto, haja vista o crescente aumento do custo dos erros de projeto, especialmente em grandes e complexos edifícios. Com os métodos, buscava-se compreender melhor o processo de projeto e assim os motivos de algumas das possíveis incongruências do edifício (JONES, 1971).

Um dos trabalhos proeminentes em métodos de projeto dessa época é de Morris Asimov – um engenheiro industrial de destaque nas décadas de 1950 e 1960 –, que descreveu no seu livro “Introduction to design”, publicado em 1962, o projeto como um processo de informação. No seu entendimento, o projeto consistia em: reunir, tratar e organizar, de forma criativa, informações relevantes para a situação problema; prescrever os efeitos das decisões que são otimizadas, comunicadas e testadas ou avaliadas; além de ter um caráter iterativo, pois, muitas vezes, novos projetos geram novas informações e novos conhecimentos, com isso repetem-se as operações iniciais (BROADBENT, 1973). O método proposto por Asimov, derivado dos sistemas da engenharia se constitui de duas escalas de operação, uma entrelaçada com a outra: a maior envolve uma sequência de fases de atividades, denominada de morfologia do projeto; a outra escala esboça um processo geral para a resolução de um problema, que é denominado de processo de projeto.

A primeira escala de operações constitui-se de uma estrutura vertical que compreende uma sequência cronológica de passos, das considerações mais abstratas às mais concretas e particulares. Nesse processo, várias realimentações baseadas na relação entre as fases incorporam-se de maneira a atender às novas exigências ou responder às novas dificuldades. Essa escala de operações constitui-se pelos seguintes estágios: estudo de viabilidade; projeto preliminar; detalhamento do projeto; planejamento do processo de produção; planejamento para

distribuição; planejamento para o consumo; planejamento para a retirada de circulação do produto. Em cada estágio, existe também uma sequência de subfases. A segunda escala de operações tem uma estrutura horizontal, que funciona como um ciclo, com os seguintes estágios: análise, síntese, avaliação e decisão, otimização, revisão e implementação.

O modelo proposto por Asimov (1962) parte da hipótese de que é possível discriminar as diferentes fases de atividades do projeto, e a distinção dessas fases é importante para a compreensão do processo de projeto. A manutenção de distintas fases de atividades, rigorosamente estabelecidas, com um início e um fim, e com a realimentação entre eles requer que critérios objetivos de desempenho sejam explicitamente estabelecidos, de maneira tal que guie o processo de projeto. Assim, a solução torna-se ligada à natureza do problema. Esse modelo consiste em atividades gerais de resolução de problemas por meio da aplicação de técnicas processuais, influenciado por pesquisas operacionais. Embora seja um modelo genérico com pouca aplicabilidade em projetos de arquitetura, influenciou os métodos de projeto arquitetônico.

Diversos métodos e estruturas de processo de projeto foram criados e aplicados especificamente para arquitetura. Jones (1971) classificou-os sob três pontos de vista: o da criatividade, o da racionalidade e o do controle do processo de projeto. Do ponto de vista da criatividade, o autor usa o conceito da caixa preta, pois o processo de projeto é decorrente de seu pensamento, e, de certa forma, está fora do próprio controle consciente. Nesses métodos retiram-se as restrições do sistema nervoso do projetista ou estimula-se a produção de resultados mais diversificados. Do ponto de vista da racionalidade, o autor usa o conceito da caixa de vidro, com um processo racional, que pode ser explicável. O projetista atua tendo um pleno conhecimento do que faz, em que momento faz e por que motivo. Nesses métodos o produto do sistema nervoso é generalizado, com símbolos externos, para incluir todas as possíveis opções. A maioria dos métodos de projetos sistemáticos inclui-se nessa categoria. O principal ponto fraco desses dois pontos de vista é a produção de um grande número de opções a ser explorado, o que pode tornar a atividade de projeto muito lenta.

Os métodos de projeto do ponto de vista do controle do processo de projeto é uma forma de criar um sistema auto-organizado, capaz de “substituir a busca cega de alternativas por uma busca inteligente, que usa tanto critérios externos quanto resultados de buscas parciais, visando encontrar atalhos num território desconhecido” (JONES, 1971, p. 393). Para isso, o esforço de

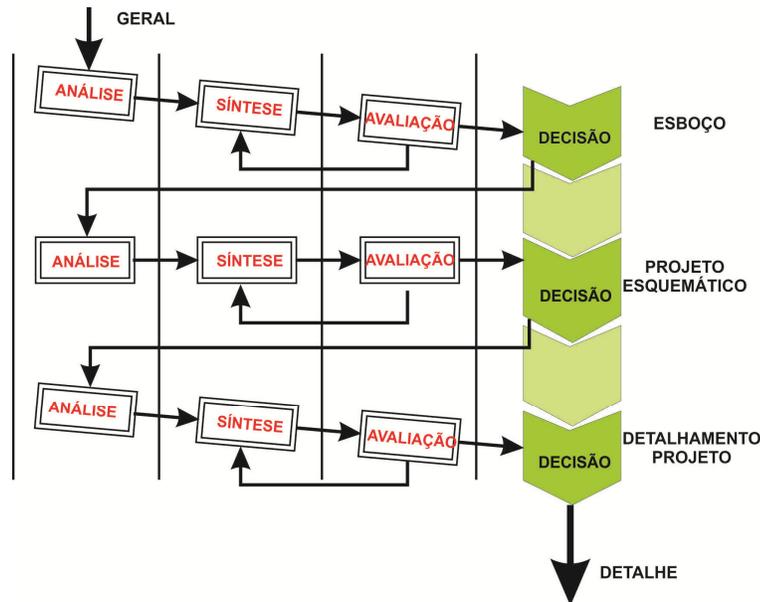
projeto se divide entre a busca de uma solução adequada e o controle e a avaliação dos padrões de busca. Esse ponto de vista é mais amplo e flexível, pois permite adaptar-se melhor às diversas situações de projeto, agrega as vantagens do método sistemático e as flexibilidades e particularidades da atividade criativa.

Na primeira Conferência sobre Métodos de Projeto, realizada em 1962, Londres, (*Conference on Design Methods*, JONES; THORNLEY, 1963), Page mostra o perigo em acreditar que o processo de projeto consiste numa sequência contínua de fases constituída por análise, síntese e avaliação, porque a maioria dos casos práticos de projeto não é sequencial. Muitas vezes, na fase de síntese, por exemplo, percebe-se que alguns aspectos do projeto não foram analisados e volta-se a produzir uma síntese modificada. Na prática, Page (1963) mostra que, em vários momentos, o processo de projeto tem um movimento circular.

De acordo com Page (1963), há uma diferença essencial entre o processo de projeto e a sequência de decisões. Segundo Broadbent (1973), era muito incomum que os estudiosos fizessem essa distinção. No Simpósio sobre Metodologia do Projeto Arquitetônico (*Design Methods in Architecture Symposium*, Portsmouth School of Architecture, 1967) estabeleceu-se um acordo para distinguir o significado desses termos. Assim, definiu-se processo de projeto como sequência íntegra de acontecimentos que parte das primeiras concepções de um projeto e vai até sua realização total; e sequência de decisões como um intervalo individual do processo de projeto, seja pela captação da informação, seja pela análise, pela síntese, etc.

Markus (1971) mostra que um método de projeto constitui-se de um processo de projeto, com sequências de decisões. Ele sugere um método composto por um processo de projeto, com crescimento no nível do detalhe (Figura 2.1), que passe por sequências de decisões, cada uma com análise, síntese, avaliação e decisão.

Figura 2.1 Modelo de processo de projeto e sequência de decisões proposta por Markus (1971)

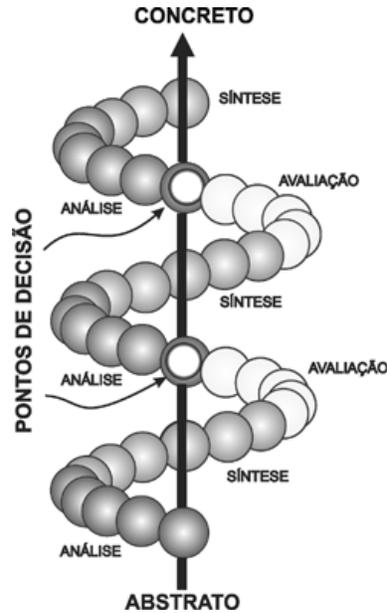


Fonte: Adaptado de Markus (1971, p.241)

A estrutura sequencial tem algumas características semelhantes ao modelo esquemático proposto por Mesarovic (1964), que representa a sequência de análise, síntese e avaliação em forma de espiral (Figura 2.2).

Um dos grandes problemas na estruturação desses métodos de projeto é que amarra os projetistas a uma sequência de eventos, que nem sempre pode estar rigidamente articulada, devido, em muitos casos, à imprevisibilidade das ações projetuais. Broadbent (1973) apresenta, a partir de estudos de casos, algumas outras características do processo de projeto: cada nova decisão leva a uma mudança das decisões iniciais, pois as decisões do processo de projeto são interdependentes; dúvida a respeito de questões de projeto atormenta a síntese e as fases do projeto em razão das decisões serem incertas; nenhum processo de projeto pode ser completamente linear, pois deve incorporar *feedback*, *return loop*, articulações; informações obtidas em qualquer fase do processo de projeto podem ser inclusas a qualquer momento nas sequências de decisões. O que é importante destacar, então, é que uma estrutura de mapa de processo de projeto deve considerar *feedbacks*, *return loops* e *articulações*, de modo que fases e estágios do processo possam estar articulados (Figura 2.3).

Figura 2.2 Modo alternativo de representar o processo de projeto apresentada por Broadbent (1973)

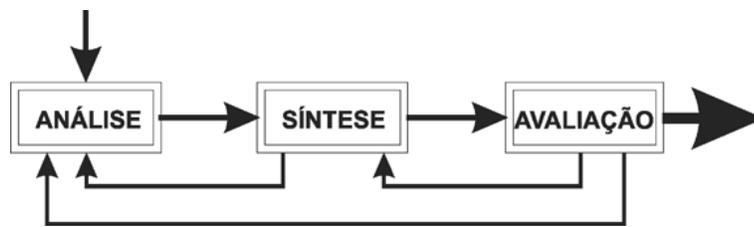


Nota: Modelo em espiral, com diversos pontos de decisão. O projeto parte do abstrato para o concreto

Fonte: Adaptado de Broadbent (1973)

Ao levar em consideração os *return loops* de cada função para uma precedente, os métodos de projeto comumente propostos permanecem com uma estrutura aparentemente lógica, de um processo que vai do geral para o particular. Segundo Lawson (2005), o mapa proposto por Marcus sugere que o processo de projeto ocorra de uma escala mais abstrata (organização geral da volumetria e disposição dos espaços) para uma mais concreta, particular (definição dos materiais de construção e detalhamento). Porém, Lawson (2005) mostra que o projeto não necessariamente tem de ir do geral para o particular, mas, muitas vezes (como na obra de Eva Jiricna e Mies van der Rohe), o particular, representado pelo detalhe, é o ponto de partida do projeto.

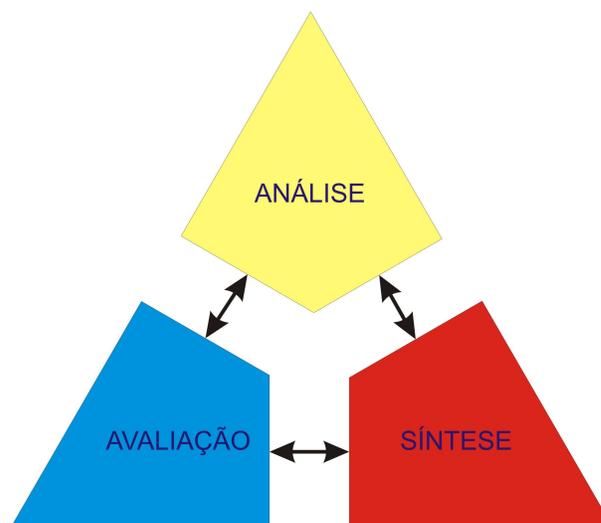
Figura 2.3 Mapa proposto por Markus (1971) das etapas da sequência de decisões com indicação dos *feedbacks* e *return loops*



Fonte: Lawson (2005, p.38)

Com base nas experiências em processo de projeto, Lawson (2005) mostra que começar por um esboço geral ou por um detalhe não é apenas uma questão do projetista, mas também, algo que pode variar de acordo com o perfil e o porte do projeto. O que pode ser um ponto de partida em um projeto pode ser matéria de finalização em outro. Uma forma mais simplificada de representar o processo de projeto é a partir da sequência de decisões compostas pela análise, síntese e avaliação. A sequência deve ser compreendida como parte de um processo de projeto flexível, articulado e com ciclos iterativos, posto de forma conjunta (Figura 2.4).

Figura 2.4 Forma para representação da sequência de decisões do processo de projeto



Fonte: Adaptado de Lawson (2005, p.40)

A Figura 2.4, embora represente um modelo esquemático, é flexível, adaptável a diferentes processos de projeto e aborda as sequências essenciais do projeto, ou seja, a análise, a síntese e a avaliação. O que se vê com frequência na literatura de metodologia de projeto é que, embora os processos variem muito, a maioria dos autores considera essa sequência como

essencial de qualquer processo de projeto arquitetônico. O exame mais detalhado dessas fases permite elucidar melhor a ação projetiva durante o processo de projeto. Vale examinar na próxima seção essas fases.

2.1.3 As fases do processo de projeto arquitetônico

2.1.3.1 Análise

A análise constitui-se na investigação das partes de um todo, tendo em vista conhecer sua natureza, suas características, suas funções, suas relações, etc. (FERREIRA, 2004). Constitui no processo de decomposição de objeto em seus diversos elementos constituintes visando obter uma melhor compreensão do todo. A análise relaciona-se com procedimentos utilizados para a compreensão das partes e do todo de um objeto.

Em arquitetura, a análise relaciona-se com a investigação do problema arquitetônico. Constitui-se na investigação dos principais elementos que compõem o problema de projeto. Nas análises, definem-se: as principais metas e objetivos que o projeto deve alcançar; os principais critérios de desempenho do edifício; as principais restrições; possíveis impactos das soluções para os usuários, clientes e localidade, etc.

No início do processo de projeto, as análises servem para auxiliar na compreensão do problema do projeto. Ao longo do desenvolvimento do processo de projeto e de geração da forma arquitetônica, novos problemas surgem e novas análises são requeridas visando compreender os problemas advindos com o desenvolvimento da solução de projeto. As análises auxiliam os projetistas na definição dos parâmetros de projeto.

Por meio da investigação dos problemas de projeto, as análises auxiliam no estabelecimento de especificações sobre os requisitos de desempenho que o edifício deve atender, por exemplo: características de dimensionamento; custo estipulado; configuração e determinação das relações entre os ambientes; perfil dos fluxos; orientações predominantes; visuais; formas de articulação do edifício com o entorno.

A análise é a fase de assimilação dos condicionantes relacionados com o projeto. Segundo Markus (1971), esses condicionantes são: esclarecimento das metas do projeto, identificação dos

problemas e da natureza das dificuldades, exploração de relações e gerenciamento dos dados. Entre os métodos empregados na análise, Jones (1971) propõe um que inicia com a discussão entre os projetistas sobre os pensamentos advindos com os primeiros contatos com o problema e finaliza com a definição de um programa arquitetônico. Alexander (1964) afirma que a análise corresponde à etapa de busca do programa mais apropriado a um dado problema.

Por meio da análise, é possível definir os principais conceitos do edifício. O conceito relaciona-se intrinsecamente com o problema do projeto e aonde se quer chegar com ele. De acordo com Deleuze e Guattari (2000), o conceito remete a um problema; sem o problema, o conceito não tem sentido. A análise de um projeto parte de um problema e de um conceito a ele associado. Esse conceito tem origem em condicionantes históricos e ideológicos, que vão definir a natureza do problema e também poderá sofrer influências de outros problemas e de outros componentes vindos de outros conceitos.

A análise, como um processo racional, relaciona-se com a obtenção e o gerenciamento de informações e dados advindos de: pesquisas de comportamento e entrevistas aos clientes; de casos precedentes; de códigos de edificações; de condicionantes culturais, econômicos e ambientais; etc. Essas informações não são o principal objetivo da análise em si, mas sim a maneira como essas informações são organizadas, de modo que possam ser úteis para as etapas subsequentes dos estágios de decisão.

2.1.3.2 Síntese

A síntese associa-se à fase criativa dos estágios de decisão. Nessa fase os arquitetos concebem as ideias e possíveis soluções que atendam aos objetivos, satisfaça às restrições e oportunidades visualizadas na etapa de análise. Kalay (2004) afirma que a síntese se constitui de passos intuitivos na busca de soluções dos problemas, por meio de organização de formas, materiais, hierarquia de visuais, orientações predominantes, iluminação e de outros tantos condicionantes, que, quando articulados na síntese, vão constituir o edifício. Segundo Markus (1971), compreende a criação das ideias, que podem expressar soluções parciais e combinações de relações parciais em soluções globalmente consistentes e factíveis de serem implementadas.

A síntese pode beneficiar-se de variadas técnicas durante a geração da forma, por exemplo, o uso de *brainstorming*, o emprego de formas precedentes, o uso de metáforas, a

exercitação de esboços reflexivos, assim como o conhecimento formal de regras de composição e estilos. Essas técnicas podem apoiar-se em métodos que explorem mais o processo criativo (caixa preta), ou a racionalidade apoiada em métodos sistemáticos.

O emprego de técnicas e métodos de decisão não é meio capaz de garantir que uma solução seja boa ou não. A solução pode ser otimizada em alguns requisitos, mas certamente tantos outros serão incompletos, podendo não ter todos os requisitos desejados ou conter conflitos internos. Lawson (2005, p. 123) assegura que “não existe uma solução ótima para um problema de projeto, mas sim, uma grande variedade de soluções aceitáveis, algumas mais outras menos satisfatórias em alguns aspectos e para diferentes clientes ou usuários.”

2.1.3.3 Avaliação

Segundo Scriven (1991, p. 139) avaliação é o “processo de determinação do mérito, importância “ou valor de alguma coisa ou ao produto de um processo”. O autor diz que o processo que compreende a avaliação inclui as seguintes ações: estipular, analisar, examinar, graduar, inspecionar, julgar, estabelecer *ranking*, estudar e testar. Preskill e Torres (1999) definem a avaliação como um processo sistêmico, planejado e intencional que envolve a coleta de dados sobre um objeto, visando ampliar o conhecimento e a tomada de decisão. Por meio da avaliação, pode-se verificar se as decisões tomadas trazem melhoria ou não para um programa, processo, produto, sistema ou organização. A avaliação associa-se ao julgamento, mérito ou valor de algo (PRESKILL; TORRES, 1999).

A avaliação em arquitetura visa garantir que uma solução proposta seja a mais aceitável. Para isso, procura detectar deficiências no projeto antes da produção, venda e uso, quando as alterações tornam-se progressivamente mais demoradas e caras. Na avaliação, a solução proposta é comparada com as metas, restrições e oportunidades que o projeto deveria atender e detectada na fase de análise do problema de projeto. O objetivo é distinguir o que é compatível e o que é conflitante, e estabelecer o grau no qual uma solução proposta atende aos requisitos de desempenho definidos na fase de análise. A avaliação é, tradicionalmente, vista como uma questão de experiência e julgamento, porém, à medida que a complexidade do projeto aumenta, as experiências e os julgamentos tornam-se menos efetivos (JONES, 1971).

Crerios qualitativos de desempenho como esttica, comportamento humano e a percepção do edifício são difceis de serem medidos e avaliados. Porém, o uso de métodos de avaliação pode ajudar os projetistas a preverem e medirem o potencial de uma solução em encontrar as metas e respeitar as restrições. De acordo com Markus (1971), a avaliação é um processo racional compreendido por: justaposição e provas; aplicação de critérios; restrições e limites; seleção da melhor solução entre as propostas; e teste de consistência de solução. Jones (1971) propõe o uso de métodos estatísticos no processo de avaliação; propõe julgamento (com base na coleta e avaliação de experiências anteriores); simulação (por meio de modelos reduzidos, desenhos, técnicas computacionais e experimentação); previsão lógica, usando mapas de interação e redes (para simular a multiplicidade de situações que o edifício pode encontrar durante seu ciclo de vida); e desenvolvimento de pré-engenharias (por meio de protótipos em escala reduzida, antes da produção, venda e operação do edifício).

Uma das principais dificuldades em avaliar uma solução é conciliar os conflitos entre diferentes qualidades concorrentes, como a ventilação, iluminação, eficiência energética, ruído, desempenho térmico, eficiência estrutural. Algumas situações de conflitos identificadas na avaliação podem ser resolvidas sem comprometer outros critérios de desempenho, mas há situações que requerem sacrifícios. Por isso, a avaliação deve ser capaz de conciliar diversas qualidades, ponderando a relevância de cada uma delas.

2.1.3.4 Representação

A análise, síntese e avaliação se repetem durante todo o processo de projeto, constituindo-se nos elementos essenciais das sequências de decisão. Cada uma dessas se articula com a outra graças aos mecanismos da comunicação. A comunicação é o meio que permite a passagem de informações entre uma fase e outra do processo de projeto.

Deficiências no projeto detectadas na avaliação podem levar à revisão da síntese, com melhorias, ajustes ou mudanças nas soluções e resultar redefinições de metas, de restrições e de requisitos de projeto na análise. Para isso, a comunicação entre essas fases torna-se um elemento fundamental, viabilizando a existência das sequências de decisões (Figura 2.5). A comunicação é o meio que permite que os participantes do processo de projeto, internos ou externos, sejam informados sobre a evolução das metas, das soluções e das avaliações.

A comunicação representa o elo entre as fases de análise, síntese e avaliação do ciclo de decisão. Serve como meio de registro e viabiliza o processo de projeto. Kalay (2004) é um processo complexo de codificação e decodificação de informações, usando, para isso, a representação. A representação, por sua vez, é a informação decodificada em um sistema simbólico que permite as partes compreenderem a informação que foi comunicada. Esta informação é usada entre as fases do ciclo de decisão, entre essas fases e os projetistas e entre os projetistas e demais envolvidos no processo de projeto. A representação da informação pode ser feita por meio de desenhos, perspectivas, modelos, especificações, anotações, etc. A representação, portanto é o quarto elemento fundamental da sequência de decisão. O modo de representação pode influenciar a formação do pensamento de projeto, com impacto direto no processo de projeto, segundo Schön e Wiggling (1992).

Figura 2.5 A comunicação permite o fluxo de informações entre as etapas da sequência de decisões



Fonte: Autoria própria

2.1.4 Atividades e habilidades requeridas no projeto arquitetônico

Embora não exista unanimidade entre os projetistas quanto aos métodos mais apropriados para a solução de projetos, há atividades e habilidades que independentemente do método de projeto escolhido, são comumente encontradas em boas práticas profissionais (LAWSON, 2005). Estas se apresentam durante as fases da sequência de decisões.

Na fase de análise, existem duas atividades/habilidades extremamente importantes: a formulação do problema e a escolha do ponto de vista (LAWSON, 2005). A formulação do problema relaciona-se com a capacidade do projetista em compreender e descrever o problema. É importante a escolha de um ponto de vista, a partir do qual, enxerga-se o problema. O ponto

de vista representa uma maneira particular de o projetista expressar e formular o problema de projeto.

Na fase de síntese, existem duas atividades/habilidades essenciais: a movimentação e a representação (LAWSON, 2005). A movimentação relaciona-se com o processo de criação, com a exploração das possíveis soluções de projeto. Ela pode alterar ou desenvolver um estado existente de solução ou envolver geradores primários. Os geradores primários são uma possível solução, concebida mesmo antes da compreensão total do problema; ou interpretações e desenvolvimentos de soluções que são concebidas *a priori*. A habilidade em movimentar-se no processo de projeto se dá por meio da representação. Quanto maior a habilidade de representação e manipulação da representação, maior será a capacidade de projeção e de se alcançar uma solução de projeto. A representação requer a habilidade do projetista em comunicar situações de projeto e saber gerenciá-las utilizando-as como assistente no desenvolvimento da solução de projeto. A habilidade de representação está na capacidade de manipulação das técnicas e na seleção dos modos de representação que melhor contribuam para a compreensão do problema e para o desenvolvimento da solução do projeto.

Na fase de avaliação, duas atividades/habilidades se destacam: a avaliação, propriamente dita, e a ação de reflexão (LAWSON, 2005). Na avaliação, o projetista precisa ser capaz de avaliar os aspectos objetivos e subjetivos do objeto arquitetônico e ser capaz de julgar sobre os reais benefícios do objeto arquitetônico. Em algumas situações, o projetista deve ser capaz de deixar de fazer o julgamento, visando à expansão e ao amadurecimento do pensamento criativo e das ideias geradoras da proposta.

A ação de reflexão associa-se intrinsecamente à avaliação da solução arquitetônica. Dá-se pela reflexão na ação, reflexão sobre a ação, princípios-guia e referências. A reflexão na ação se baseia na ideia do profissional reflexivo (SCHÖN, 1983). Segundo esse conceito, o processo de reflexão é contínuo e perpassa pela compreensão do problema e pela validação das soluções. A reflexão sobre a ação associa-se à capacidade do profissional em reconhecer situações, saber que certas abordagens podem ser mais apropriadas para certas situações e saber como empregar as abordagens mais apropriadas e da melhor maneira possível. Sucessivas pesquisas durante o processo de projeto levam a uma progressiva compreensão do problema de projeto, o que resulta na formação de certos princípios-guia. A capacidade de reconhecer, em certas situações, características que possam ser conectadas com outras precedentes é uma habilidade

fundamental de um projetista. Essa habilidade relaciona-se com uma ação de reflexão e mostra que a avaliação pode, enquanto reflexão, servir para a síntese arquitetônica.

O processo de projeto arquitetônico é dinâmico, composto por diversas fases, por ciclos de decisões e métodos diversificados, desde os mais sistemáticos aos mais intuitivos. Esse processo exige dos projetistas que realizem certas atividades e tenham habilidades específicas para a busca da solução do projeto desejada. Compreender diferentes métodos, técnicas e habilidades que o projetista deve ter para resolver problemas de projeto pode ser um ponto de partida para o aprofundamento das pesquisas em metodologia de projeto. Conhecer diferentes métodos de projeto e saber em que tipo de problema de projeto eles podem ser utilizados é uma habilidade fundamental do arquiteto.

2.2 Evolução do uso do Computador no Projeto Arquitetônico

O interesse pelo uso do computador no projeto arquitetônico surgiu nos anos 1960, e primeiro no mundo acadêmico. Instituições de pesquisa e eventos internacionais que tratavam dos processos de projeto passaram a considerar as possibilidades de utilização do computador na atividade projetiva. Na década de 1960, diversas aplicações do computador em projeto já eram visíveis.

Dos anos 1960 para os anos 2000, muitas transformações ocorreram no cenário da computação aplicada a projeto de arquitetura. Durante esse período, o computador passou de mera ferramenta a protagonista do processo de projeto. Nesses quarenta anos, o Projeto Assistido por Computador, passou, segundo Kalay (2004), por três gerações de sistemas. Recentemente, o computador aparece como um instrumento de subversão da ordem projetual tradicional; ele representa uma quarta geração de sistemas computacionais aplicada a projeto.

A primeira geração de sistemas de projeto assistida por computador desenvolveu-se em dois diferentes campos: modelagem geométrica e construção civil. No primeiro campo, foram desenvolvidos sistemas computacionais para ajudar engenheiros na modelagem de curvas complexas aplicadas à indústria automotiva e aeroespacial (KALAY, 2004). No campo da construção civil, os primeiros sistemas de projeto assistidos por computador aparecem,

principalmente, no mundo acadêmico, e tratam de sistemas de vários tipos. Esses sistemas abordavam vários aspectos do processo de projeto (BROADBENT, 1971).

Essa primeira geração de sistemas CAD de projeto assistida por computador (*Computer Aided Design*) explorou, pela primeira vez, o que Mitchell (1975) chamou de paradigmas fundamentais do projeto arquitetônico assistido do computador – *Computer Aided Architectural Design* (CAAD). A abordagem do problema arquitetônico passa a considerar diretamente o projeto arquitetônico, ao invés de um ponto de vista mais genérico, ligado à ciência da computação. A primeira geração caracteriza-se pelas seguintes capacidades: representar projetos por meio de estruturas de dados armazenados no computador; transformar estruturas de dados armazenadas no computador, contendo atributos de valores, em leitores ou geradores de potenciais soluções de projeto arquitetônico, de forma automática; testar soluções de projeto e verificar se cumprem os requisitos estabelecidos; entender Projeto Assistido por Computador como processo de divisão de funções entre projetistas e máquina (MITCHELL, 1975). Mesmo com todas as tentativas de incluir o computador no processo de projeto arquitetônico, Kalay (2004) mostra que ainda eram difíceis serem usadas em projeto. Além do mais, pelo alto valor do computador, o uso do CAD em arquitetura era restrito.

A segunda geração de sistemas de projeto assistidas por computador estava voltada, principalmente, para a representação do desenho e dos sistemas de modelagem. O significado do CAD, nessa geração, estava mais para o Desenho assistido por computador (*Computer Aided Drawing*) de que para o Projeto Assistido por Computador (*Computer Aided Design*), que era mais típico da geração anterior. Enquanto a primeira geração requeria computadores poderosos, capazes de processar grande quantidade de informações e dispositivos gráficos caros, para visualização, a segunda geração se desenvolve e se consolida com a introdução e proliferação dos computadores pessoais e com a redução dos custos das tecnologias de visualização e dos dispositivos de entradas de dados – mouses, mesa digitalizadora, etc. (KALAY, 2004).

A característica principal dessa geração está no desenvolvimento de sistemas voltados para o desenho e para a modelagem do edifício, ao invés de sistemas voltados para o projeto arquitetônico propriamente dito. Se, de um lado, é uma geração em que ocorrem melhorias na representação do projeto, por outro, simboliza uma perda do uso do computador como instrumento de análise e orientação da atividade projetiva do arquiteto (KALAY, 2004).

A terceira geração de sistemas de Projeto Assistido por Computador ocorre com o desenvolvimento de softwares de CAD mais inteligentes. Primeiramente, em áreas como a indústria eletrônica, automotiva e aeroespacial e depois em arquitetura, com diversos esforços, principalmente da comunidade acadêmica. Essa geração é marcada por resgatar o foco do uso do computador como instrumento de suporte ao processo de projeto arquitetônico; aprofundar pesquisas em áreas como Programação de Objeto Orientado - *Object-Orient Programming* (OOP), Inteligência Artificial, *Artificial Intelligence* (IA), sistemas de gerenciamento de banco de dados, *Data-Base Management Systems* (DBMS); parametrização, etc.; consolidar e desenvolver processos de projeto digital (KALAY, 2004).

O grande desafio da terceira geração de CAD é o de desenvolver ferramentas de projeto que tenham um uso efetivo em um sistema de suporte ao projeto e que também seja comercialmente viável. Além da ineficiência de algumas dessas ferramentas, ocorre, também, certa relutância por parte dos arquitetos em substituírem alguns dos estágios do processo de projeto analógico, sistemas digitais de automatização (KALAY, 2004).

Nos últimos anos, surge uma nova geração de uso do computador no processo de projeto. Esta começa a ter uma expressividade internacional, principalmente a partir dos anos 1990, em paralelo à terceira geração de projetos assistidos por computador. Essa nova geração, que, segundo Oxman (2006), foi celebrada em diferentes conferências, competições e exposições, surgiu da exploração do meio digital como ferramenta usada na determinação da forma e sua transformação. Esta implica profundas mudanças conceituais no projeto de arquitetura.

Esse cenário representa uma transformação profunda do uso do computador no processo de projeto. Substituem-se as teorias e os métodos que embasaram as gerações anteriores de projetos arquitetônicos assistidos por computador (que tinham seus fundamentos nos processos de projeto tradicionais, intermediados pela representação baseado no papel) por uma reintrodução de diferentes métodos de conceituação. Nesse cenário, segundo Oxman (2008a), o conceito de Projeto Assistido por Computador - *Computer-Aided Design* (CAD) - é substituído pelo Projeto Arquitetônico Digital, *Digital Architectural Design* (DAD) .

Nessa nova tendência, as formas geradas digitalmente não são concebidas ou desenhadas seguindo o conceito tradicional de projeto, mas são calculadas a partir do método digital de geração da forma proposto pelo arquiteto. O arquiteto deixa de modelar formas para

articular uma lógica interna de geração da forma. Esta, por sua vez, pode produzir, de maneira automática, uma gama de possibilidades formais, dentre as quais, o arquiteto pode escolher aquela mais apropriada para ser desenvolvida (KOLAREVIC, 2003).

A relação entre projeto e desenho com uma intermediação implícita pelo arquiteto é substituída por relações mais explícitas, dotadas de sistemas de informação e de bases de conhecimentos que vão participar diretamente dos mecanismos computacionais de geração da forma. Nesse novo cenário, os modelos de projeto digital incorporam conceitos advindos da filosofia como multiplicidade, articulação, corte, superposição (DELEUSE, GUATTARI, 2000). Continuidade, dinâmica, transformação substituem normas e conceitos do processo tradicional de projeto, expressos em malhas, repetição, simetria, produção em massa e tipologia.

Esse novo território conceitual, formal e de exploração de uma nova tectônica, que advém com processo de projeto digital, abre espaço para uma morfologia arquitetônica que está focada em propriedades emergentes e adaptativas da forma. Nesse território, o conceito de estável, sólido, duradouro é substituído pelo de variedade, singularidade e multiplicidade (KOLAREVIC, 2003).

Os novos processos digitais contribuem para a emergência de novos vocabulários conceituais e novos domínios de conhecimento. Nesse cenário, a arquitetura digital é definida como processos de criação e transformação da forma, com base no computador. Segundo Kolarevic (2003), esses são processos de morfogêneses digitais, em que a pluralidade arquitetônica se caracteriza pela multiplicidade inerente às diversas lógicas que fundamentam os conceitos computacionais essenciais, e que vão guiar os processos de projeto. Como exemplos, podem-se citar: a geometria topológica; as polissuperfícies isomórficas; o movimento cinemático e dinâmico; a animação de formas chaves; o projeto paramétrico; o algoritmo genético, o desempenho, entre outros (KOLAREVIC, 2003).

Nessa quarta geração, novos softwares são desenvolvidos com base nos conceitos apresentados acima. Os processos de projeto mudam significativamente, em especial, na relação entre o arquiteto e os principais estágios do processo de projeto, ou seja, análise, síntese, avaliação, e no modo como se dá a comunicação.

2.3 Computador no Projeto Arquitetônico

Apoiado em exemplos práticos de aplicativos computacionais, discute-se nesta seção o uso do computador nas diferentes fases do processo de projeto arquitetônico.

2.3.1 O uso do computador no programa arquitetônico

Durante a realização do programa arquitetônico, os projetistas procuram desvendar as questões mais pertinentes à resolução do problema de projeto, com base nas informações coletadas sobre o problema. Nessa fase, também se definem o papel dos diversos envolvidos no processo de projeto (clientes, projetistas, construtores, etc.), os tipos de colaboração, os principais conceitos do projeto e as principais linhas de investigação das propostas. Em seguida, formulam-se os objetivos e as metas do projeto.

Para reduzir as incertezas e ter uma compreensão mais clara do problema, os projetistas precisam proceder à coleta de dados e às informações sobre o projeto; estabelecerem análises e previsões técnicas precisas (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995). Os dados e informações podem ser sobre as necessidades dos clientes, o desempenho dos materiais e componentes que possam ser empregados no projeto, as condições da localidade (clima, topografia, características do solo), aspectos relacionados com o custo da execução do edifício e as condições de uso, etc.

Embora erros e falhas possam ocorrer em projetos de qualquer natureza, a obtenção de informações precisas sobre o problema de projeto e de técnicas de análises, afinadas para produzir previsões sobre possíveis soluções de projeto, pode reduzir as incertezas de projeto, melhorar o desempenho e se aproximar das soluções desejadas (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995).

Por outro lado, o aumento da complexidade dos projetos associados à crescente exigência de desempenho e ao aumento do número de profissionais especializados, participando de um mesmo projeto, tem acarretado maior necessidade de obtenção, filtragem e organização de informações de projeto (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995). O resultado é que o número de informações torna-se excessivamente grande e difícil de ser gerenciado de modo analógico.

Essa situação retrata um quadro propício para o uso do computador como instrumento de auxílio ao planejamento do projeto. Entre as possibilidades de uso do computador nessa fase, podem-se citar: coleta de informações, ex.: *Community Viz™* (ENVIRONMENTAL SIMULATION CENTER, 2005); estruturação, ex.: *Hierarchical Decomposition of Systems* (HIDECS); planejamento, ex.: KMAN Systems (CERULLI, 2006); EuroSTEP (EUROSTEP, 2007); ONUMA Planning System (ONUMA, 2007).

2.3.2 O uso do computador na concepção do projeto arquitetônico

O emprego mais significativo do computador no processo de projeto de arquitetura ocorre na concepção do edifício. Se para alguns o computador tem fascinado profundamente como um instrumento que contribui com a síntese da forma (STEELE, 2001; KOLAREVIC, 2003; SZALAPAJ, 2005; MEREDITH, 2008), para outros, ele tira a capacidade humana de projetar. Esses últimos defendem a tese de que o projeto é uma atitude acima de tudo subjetiva, e não pode ser feito senão pelo próprio homem.

Segundo Picon (2007), o papel do computador na geração da forma arquitetônica pode ser expresso em duas categorias. Na primeira, ele é visto apenas como uma ferramenta avançada de produção de formas sofisticadas e de melhor controle destas. Nesse caso, o computador “[...] não altera significativamente a natureza da arquitetura que é produzida” e, nem se tem interesse em [...] “entrar nos detalhes de seus processos internos (PICON, 2007, p. vii).⁵ Na segunda, é visto como um efetivo instrumento de mudança no processo criativo de projeto. Nesse caso é preciso penetrar na programação da “caixa preta”.

Essas duas categorias de uso do computador no processo de projeto arquitetônico apresentados por Picon podem ser expressas na diferença entre informatização (*computerization*) e computação (*computation*) proposta por Terzidis (2007). A primeira categoria apresentada por Picon associa-se à informatização. Ou seja, “[...] envolve a digitalização de entidades ou processos que são preconcebidos, predeterminados, e bem definidos” e se relaciona com a “[...]

⁵ No original: “[...] does alter significantly the nature of the architecture that is produced [...]”to enter into the details of its inner processes.”

automação, mecanização, digitalização e conversão” (TERZIDIS, 2007, p. xi).⁶ A segunda categoria de Picon se associa à computação. Por meio da sua natureza exploratória, visa “[...] imitar ou servir como uma extensão do intelecto humano [...]” na exploração do indeterminado, do vago, do obscuro e, muitas vezes, de processos mal definidos”.⁷ Terzidis (2007) mostra que a computação se relaciona com os conceitos de racionalização, raciocínio, lógica, algoritmo, dedução, indução, exploração e estimativa. Tem sua aplicação relacionada com a resolução de problemas, as estruturas mentais, os processos cognitivos, a simulação, a inteligência baseada em regras, etc.

A maioria dos processos de projeto que faz uso do computador, segundo Terzidis (2007), está dominada pela informatização, pois, segundo ele, no momento do uso do computador, as principais ideias já foram concebidas na mente dos projetistas. O computador aparece então como meio de manipulação, armazenamento e organização das ideias, previamente concebidas. Já o processo de projeto baseado na computação é algo com uso mais recente na prática corrente da arquitetura. O resultado da pouca exploração da computação é que o projetista deixa de usufruir as vantagens do computador como um instrumento efetivo de contribuição nas decisões de projeto.

Diversos aplicativos computacionais vêm sendo desenvolvidos, nos últimos anos, com o objetivo de aumentar o potencial de exploração da computação na concepção da arquitetura. Visam unir complexidade e alta capacidade computacional com um uso criativo do computador. Kalay (2004) classifica os métodos baseados em ferramentas computacionais usados na fase de síntese em três categorias: métodos processuais, métodos heurísticos e métodos evolucionários.

2.3.2.1 Métodos processuais de síntese

Os métodos processuais de geração da forma foram os primeiros métodos computacionais utilizados na etapa de síntese do projeto (KALAY, 2004). Com a aplicação criteriosa de um número relativamente pequeno de condições, é possível gerar uma quantidade

⁶ No original: “[...] involves the digitalization of entities or processes that are preconceived, predetermined, and well defined [...]” “automation, mechanization, digitalization, and conversion.”

⁷ “[...] aims at emulating or extending the human intellect [...] exploration of indeterminate, vague, unclear, and often ill-defined processes.”

significativa de formas, de maneira rápida, precisa e consistente. O problema apresentado por Lawson (2004) para métodos como esse é que muitos dos aplicativos que utilizam métodos processuais resolvem questões pontuais de projeto. Sendo assim, não representam o potencial de possibilidades de exploração do projeto, o que o faz ser rejeitado por muitos projetistas.

Por outro lado, diversas experiências retratam vantagens de uso do método processual. Estes podem representar um ganho efetivo de qualidade quando usados para resolver problemas arquitetônicos de certas classes de projetos. Dentro dessa classificação, Kalay (2004) destaca: método de enumeração completa, método de alocação dos espaços e método de satisfação de restrição. O primeiro consiste em gerar um grande número de possíveis soluções de projeto com o computador. De preferência todas as possíveis soluções para um problema de projeto. O segundo, de acordo com Andreoli (2000), é o arranjo de um conjunto de elementos sobre um espaço predefinido. Para Liggett (2000), requer métodos de avaliação de maneira a guiar o processo de geração de leiautes.

O método de satisfação de restrições, segundo Kalay (2004), representa uma tentativa de melhorar a alocação de espaços por meio da inclusão de critérios adicionais de projeto no processo de decisão, com a adição de restrições. Nesse caso, o processo de projeto adiciona restrições ao algoritmo de modo a gerar leiautes com base em módulos muito restritivos. Um exemplo de aplicativo que utiliza esse método é o *Basic Architectural Investigation and Design system* (BAID). Este busca conciliar questões de alocação dos espaços com incidência de luz solar e privacidade num processo de geração aleatória de leiautes.

Algumas abordagens particulares envolvem problemas de satisfação de restrições. Entre elas, Kalay (2004) cita o gerenciamento de restrições e a aproximação sucessiva. O método de gerenciamento de restrições constitui-se na organização de restrições de forma hierarquicamente dependente e resolvida consecutivamente por meio da atribuição de valores que satisfaçam restrições individuais. Como exemplo de aplicativo de gerenciamento de restrições, pode-se citar o IMAGE (WEINZAPFEL; HANDLE, 1975 *apud* KALAY, 2004 e o ALEX (KALAY, 1985 *apud* KALAY, 2004). O IMAGE é um gerador de leiautes que usa várias relações geométricas (próximo/distante, parede compartilhada, adjacente, em cima, fora, sobrepor) como limitadores de projeto. O ALEX é um sistema utilizado no projeto de habitações unifamiliares.

No método de aproximação sucessiva, as restrições são aplicadas ao problema de maneira sequencial. Ao invés de se chegar a uma solução satisfatória, busca-se satisfazer a requisitos mínimos durante o processo de geração e progressivamente é melhorado de modo a atender a outras restrições até se chegar a um grau de melhoria satisfatória.

2.3.2.2 Métodos heurísticos de síntese

Enquanto os métodos processuais de geração da forma requerem uma compreensão completa dos passos para a resolução de um problema, a utilização de métodos heurísticos de geração da forma torna os processos menos rígidos e baseados em aproximações em vez de se basear num conhecimento preciso. Aproximam-se mais da prática de projeto de arquitetura (KALAY, 2004). Diversas experiências de aplicação desses métodos heurísticos têm sido utilizadas desde a década de 1960, formalizados pelas pesquisas em Inteligência Artificial. Muitas delas se relacionam com o problema do planejamento do espaço e classificação de tipos alternativos de leiaute (LIGGETT, 2000).

O uso de métodos heurísticos na solução de problemas de projeto não é garantia de se chegar a uma solução de projeto ou que a solução alcançada de um problema de projeto seja ótima. Porém, pelo fato de se basear num raciocínio não exato, com lacunas e inconsistências lógicas, seguindo uma visão global e holística do problema de projeto, são capazes de resolver problemas que os métodos processuais não são capazes de resolver (KALAY, 2004).

Entre os principais tipos de métodos heurísticos, destacam-se: a) métodos baseados em analogia; b) métodos baseados em casos; c) métodos baseados em regras; d) gramáticas da forma; e) fractais.

Métodos baseados em analogias

Entre os métodos computacionais baseados em analogias utilizadas em projeto de arquitetura, Kalay (2004) cita: Teoria do grafo – a maioria dos trabalhos que usa esse método se baseia em *Systematic Layout Planning* (SLP), desenvolvido por Muther (1974); Metáfora elétrica – grafo seguindo a metáfora das redes elétricas para guiar a síntese computacional da forma arquitetônica (MARCH; STEDMAN, 1971 *apud* KALAY, 2004); Metáfora mecânica – são utilizadas técnicas da mecânica denominada *Physically Based Space Planning*, que consiste no uso

de analogias a um sistema de “massas-mola-amortecedores” usado para conectar espaços (ARVIN; HOUSE, 2002).

Métodos baseados em casos

O emprego de casos precedentes e sua adaptação às necessidades e circunstâncias de novos problemas tem sido algo recorrente ao longo da história de arquitetura. Segundo Kalay (2004), o emprego de casos precedentes pode ser justificado pela proximidade que muitos problemas têm com os antecedentes (similaridade das necessidades humanas). Além disso, é preferível adaptar novas soluções, por meio de soluções precedentes completas, que tentar construir soluções a partir do zero.

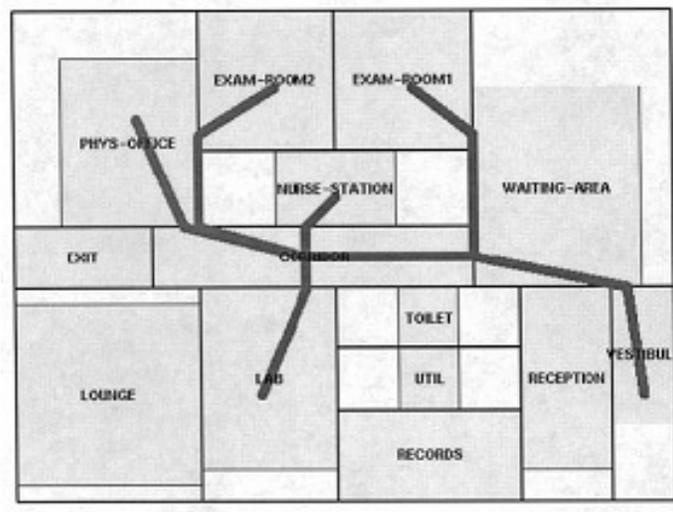
Uma maneira existente de formalizar o conhecimento de casos antecedentes de projeto, apoiada por sistemas computacionais, é por meio dos *Case-based Reasoning* (CBR). O CBR é um ramo da Inteligência Artificial que procura criar estratégias para resolução de problemas a partir de analogias com problemas já existentes. Para isso, o CBR se baseia em um banco de dados no qual as soluções podem ser recuperadas da memória do computador. O problema nos CBR é resolvido utilizando soluções já propostas ou conhecidas (KOLODNER, 1992). Procura-se empregar problemas concretos no lugar de operações abstratas, e para isso, utiliza-se a vasta capacidade de armazenamento e a velocidade de processamento do computador.

Conforme Kolodner (1992), um caso é constituído basicamente de definição do problema, solução e o resultado. Esses três componentes são a base de um índice que poderá ser utilizado posteriormente, quando as informações forem recuperadas de um banco de dados. A recuperação de casos, por sua vez, é geralmente baseada na comparação entre os atributos do problema alvo com os índices de casos armazenados.

Diversas pesquisas têm utilizado o CBR nos processos de geração da forma. Algumas dessas pesquisas têm combinado o CBR com sistemas automatizados de geração da forma. Esses sistemas tentam gerar variações paramétricas ou mesmo topológicas dos casos recuperados, de maneira que possam combinar atributos das soluções novas com de outras soluções semelhantes. Entre esses, podem-se destacar: *Case and Decomposition Knowledge for Design Synthesis* (CADSYN); *Software Environment to Support Early Phases in Building Design* (SEED). O primeiro procura incluir tanto um sistema computacional baseado em caso como um mecanismo

de mutação que pode incluir partes de outros casos (MAHER; ZHANG, 1991); O SEED é um sistema baseado em casos, que, a partir de casos precedentes, arquivados como protótipos, utiliza-os como base para a resolução de novos projetos. O objetivo é fornecer suporte para o desenvolvimento das etapas iniciais de projeto por meio de mecanismos de análise, avaliação e geração de projeto de modo mais preciso. Constituem-se de vários módulos. Esses módulos podem gerar, por exemplo, leiautes esquemáticos de espaços retangulares sob várias restrições que incluem acesso, iluminação natural e privacidade. Os módulos são: *Architectural Programming* (SEED Programming); *Schematic Layout Design* (SEED Layout) (Figura 2.6); *Schematic Configuration Design* – SEED Config (FLEMMING, 2006).

Figura 2.6 Caminhos de acesso usando o SEED Layout



Fonte: Liggett (2000)

Métodos baseados em regras

Os métodos baseados em regras são sistemas especialistas. Esses são sistemas computacionais projetados para obter e representar o conhecimento de um especialista na forma de regras. Com o uso de sistemas especialistas, é possível oferecer soluções de alto nível para problemas complexos, explicar como se chegou a certas soluções e incorporar novos conhecimentos (KALAY, 2004).

Os sistemas especialistas são geralmente codificados pelo condicional *If/then* e por expressões lógicas *and/or* (KOLODNER, 1992). A parte *If* de uma regra consiste de algumas condições generalizadas, na qual, se preencher as condições do problemas, então ativa a regra

then, que pode acrescentar, apagar ou modificar fatos, e derivar conclusões deles. Esse mecanismo pode ser feito por meio de um raciocínio dedutivo (motor de inferência usa regras com base em fatos conhecidos) e raciocínio abduutivo (motor de inferência usa regras baseadas em outros fatos).

Uma categoria de uso dos sistemas baseados em regras é para resolução de problemas de leiautes que apresentam áreas desiguais em termos de organização de retângulos. Para esses casos, Liggett (2000) apresenta três métodos: LOOS (*loosely-packed*), WRIGHT e HeGel (*Heuristic Generation of Layouts*). Todos esses casos procuram resolver o problema de arranjo de retângulos com lados paralelos aos sistemas ortogonais. Estes tentam satisfazer dois tipos de restrições: um que estabelece as regras para a não sobreposição dos retângulos e para o encaixe dentro dos limites dados; e outro que estabelece um conjunto de restrições, como atributos de área, dimensão, orientação e regras para adjacência (LIGGETT, 2000).

Um sistema baseado em regra que é utilizado para um caso bem específico de problema de projeto é o PREliminary Design of KITchens (PREDIKT), segundo Oxman (1992 *apud* KALAY, 2004). Esse é um sistema especialista que resgata o conhecimento de projeto de cozinha, incorporando sistemas de conhecimento que são utilizados tanto para a avaliação de leiautes de cozinhas como para a geração de leiautes. Esse aplicativo utiliza um sistema especialista baseado em regras para facilitar a “[...] tradução entre diferentes níveis de abstração e a geração e avaliação de alternativas de projeto. Ele pode inferir nas decisões de projeto que são implícitas e avaliar suas conveniências (KALAY, 2004, p. 355).⁸

Gramática da forma

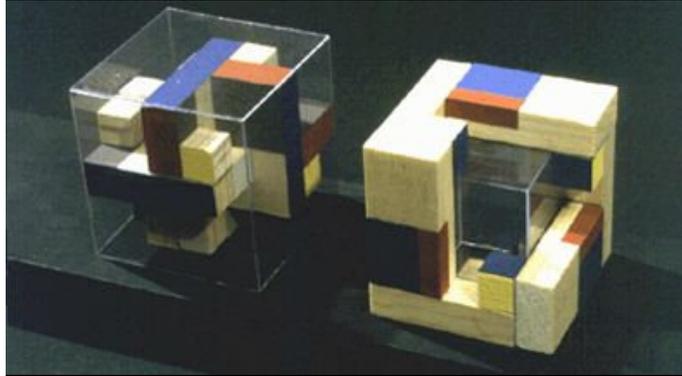
A gramática da forma é, para Celani (2008), essencialmente um sistema de geração baseado em regras. Para Celani *et al.* (2006, p. 2) é uma “estrutura computacional capaz de descrever uma linguagem formal por meio de regras e um alfabeto”. A gramática da forma, para esses autores, pode ser do tipo generativo ou analítica.

Na gramática da forma, uma série de regras pode ser aplicada consecutivamente para uma construção geométrica no intuito de modificar suas partes constituintes por meio de

⁸ No original: “[...] translation between different levels of abstraction and the generation and evaluation of design alternatives. It can infer implied design decisions and evaluate their desirability.”

transformações geométricas. Segundo Celani *et al.* (2006), a gramática da forma constitui-se por um vocabulário de formas, relações espaciais, regras e de uma forma inicial, pertencente ao vocabulário de formas. Após a definição dos elementos essenciais, inicia-se um processo constituído por iterações até se chegar a uma composição de forma desejada (Figura 2.7).

Figura 2.7 Uso da gramática da forma em educação: Museu de arte em Taipei (Taiwan): trabalho do aluno Wei-Cheng Chang



Fonte: Knight (1999-2000)

Fractais

O sistema de geração de fractais constitui-se por uma estrutura baseada na aplicação de regras recursivas em um objeto (CELANI, 2008). A geração de um sistema de fractais é muito simples e constitui-se por um objeto geométrico inicial (chamado de iniciador) e da aplicação de tema (*motif*), que se repete em todas as escalas e se chama de gerador. O Fractal é então construído pela aplicação de um gerador na geometria inicial, derivando objetos geométricos que podem ser considerados como compostos de diferentes iniciadores, dependendo do nível de hierarquia da escala (BATTY; LONGLEY, 1994).

Segundo Celani (2008), as principais características dos Fractais são sua auto similaridade. Quanto maior o número de repetição, maior será a variação nas soluções iniciais geradas.

2.3.2.3 Métodos evolucionários de síntese

Os métodos evolucionários são aqueles capazes de gerar formas que não tenham sido predefinidas por programadores de maneira explícita ou por meio de procedimentos e regras.

São métodos ainda pouco utilizados na esfera da engenharia e arquitetura (TESSMANN, 2008). Esses métodos, comparados com os anteriores, têm a grande vantagem de não, necessariamente, estarem influenciados por princípios adquiridos da experiência humana.

Segundo Mitchell (1999), são pesquisas, aprendizagens, otimizações e modelagens de métodos, que algumas vezes, estão inspiradas na biologia evolutiva.

Métodos evolucionários se associam ao conceito de emergência. A emergência da forma, em geral, se dá como algo não fixo. Para isso, utilizam algoritmos de busca estocástica. A emergência ocorre à medida que o processo se desenvolve. Essa emergência não previsível e sem uma estrutura bem definida, baseada em algoritmos de busca estocásticos, é considerada como um dos pontos essenciais do projeto criativo (TESSMANN, 2008).

O processo de emergência é, na opinião de Kalay (2004), um processo perceptivo e cognitivo. Primeiro são definidas as condições que permitem a interpretação dos elementos arquitetônicos e depois são atribuídos a esses elementos os significados necessários. A primeira modalidade é sintática e se baseia em ver ou imaginar o que não foi explícita ou intencionalmente desenhado. A segunda é interpretativa, um processo de imaginação, da compreensão de que o valor percebido faz ou pode representar algo. Ambas as esferas da visão e da imaginação estão intrinsecamente relacionadas e reforçam-se mutuamente (GOLDSCHMIDT, 1991).

A ideia de emergência costumeiramente conhecida relaciona-se com a esfera humana, distante da ideia de uso num sistema computacional. Segundo Kalay (2004), o uso da emergência em sistemas computacionais refere-se a dois tipos de problemas que são: como criar formas e como reconhecer que as formas surgidas sejam interessantes ou significativas. A resposta para isso está em alguns dos mais promissores métodos evolucionários de emergência, alguns deles comentados a seguir.

Estratégias evolutivas

As estratégias evolutivas foram originalmente formuladas, segundo Mitchell (1999), para trabalhar em problemas reais de otimização de parâmetros de desempenho de projeto, por exemplo, a otimização do desempenho da asa de um avião. Segundo a autora, as estratégias evolutivas foram introduzidas por Rechenberg, na década de 1960, e posteriormente

desenvolvidas por Schwefer. Elas ainda são comumente aplicadas a problemas de otimização numérica.

As estratégias evolutivas utilizam, segundo Castro e Von Zuben (2009), técnicas de mutação para realizar modificações e promover mutações e recombinações como instrumento do processo de busca. Para isso, utiliza operadores determinísticos com população de pais e filhos com tamanhos independentes.

Programação evolutiva

A programação evolutiva foi inicialmente desenvolvida por Fogel, Owens e Walsh (1966). Na abordagem original da computação evolutiva, soluções candidatas à resolução de um dado problema eram representadas por máquinas de estado finito. Estas evoluem pela mutação aleatória de seu diagrama de transição de estado, e, a partir daí, são selecionadas as soluções mais aptas.

Algoritmo genético

O Algoritmo Genético, *Genetic Algorithm* (GA) foi inicialmente formulado como um meio para estudar formalmente o fenômeno que ocorre na natureza do desenvolvimento dos mecanismos de adaptação natural, utilizando, para isso, sistemas computacionais (MITCHELL, 1999). Foi inicialmente concebido por Holland (1975) já na década de 1960.

O GA é uma técnica de programação que imita a evolução biológica e a estuda como um problema de estratégia de resolução (MARCZYK, 2004). A partir de um dado problema, o algoritmo genético estabelece uma população de potenciais soluções, chamada de fenótipos, que são representados por seus códigos genéticos, ou genótipos. A etapa seguinte consiste na avaliação das soluções candidatas, de acordo com a função *fitness*. Essa etapa é usada para selecionar os fenótipos mais aptos dentro da população de soluções candidatas. Esses fenótipos mais aptos, por sua vez, são mantidos e dados a permissão para “reprodução” e criação de fenótipos. Para um possível melhoramento, as populações (soluções) podem sofrer cruzamentos e mutações. Os genótipos que correspondem às soluções que não tenham sido escolhidas (de forma aleatória) são excluídos (MARCZYK, 2004).

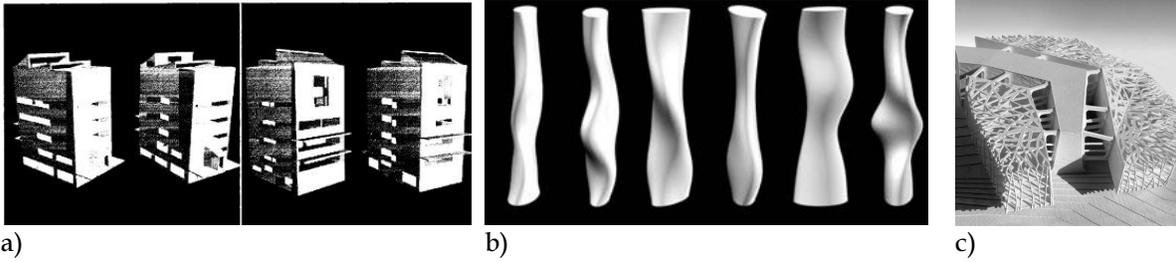
Para se trabalhar com um GA, é necessário estabelecer um método para codificar as possíveis soluções para um problema, de modo que um computador possa ler e interpretar. Marczyk (2004) apresenta quatro possíveis métodos de realização dessa codificação, por meio: das sequências binárias (1 e 0); de matrizes de números inteiros ou números decimais; da representação dos indivíduos em um GA como uma sequência de letras, em que cada letra represente um aspecto específico da solução; e de ramificações e estruturas de dados que são denominadas de árvores (KOZA *et al.*, 2003 *apud* MARCZYK, 2004).

Existem várias técnicas que podem ser utilizadas por um GA para a seleção das soluções escolhidas. Alguns dessas têm uso exclusivo, outras podem ser usadas em combinação com outras. As principais, segundo Marczyk (2004), são: seleção elitista, seleção proporcional *fitness*, roleta de seleção, escala de seleção, seleção por torneio, *rank* de seleção, seleção por geração, seleção de estado estacionário, seleção hierárquica.

Além do processo de seleção das soluções em um GA, podem existir ajustes visando melhorar a aptidão da próxima geração. As técnicas utilizadas para isso são: mutação e cruzamento. A primeira consiste na mudança em alguns genes de um algoritmo genético. Com isso, fazem-se pequenas alterações nos pontos dos códigos de um indivíduo. O cruzamento consiste na geração de descendentes, por meio do cruzamento de segmentos dos códigos genéticos dos pais (MARCZYK, 2004).

Vários outros autores como Frazer (1995), Maher e Poon (1996), Terzidis (2007), Fasoulaki (2008), Tessmann (2008) mostram como a GA pode ser utilizada num processo evolucionário de arquitetura. Alguns exemplos de sistema têm procurado combinar a GA com outras técnicas. Na Figura 2.8, apresentam-se alguns exemplos.

Figura 2.8 Exemplos de uso de algoritmo genético



Nota: a) Sistema de geração de projeto baseado na evolução, proposto; b) População gerada por método evolucionário; c) Projeto para a nova biblioteca nacional checa, Praga, 2006

Fonte: Respectivamente Caldas (2001, p. 147); Fasoulaki (2008, p. 47); Hensel; Menges (2008, p. 107)

Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais, *Artificial Neural Networks* (ANN) são modelos computacionais que procuram estabelecer um paralelo entre a estrutura e os aspectos funcionais dos processos de informações do cérebro humano. As ANN são empregadas em diferentes áreas de conhecimento e utilizadas para resolução de problemas complexos do mundo real, problemas que seriam difíceis de resolver com as tecnologias tradicionais (KALAY, 2004). Como aplicação prática de ANN, Kalay (2004) cita um aplicativo denominado *Parallel Distributed Processing Analogical Architectural Modeler* (PDP-AAM) (PETROVIC, 1994 *apud* KALAY, 2004) desenvolvido para dar apoio à construção de casas unifamiliares, por meio de catálogos de componentes pré-fabricados de um sistema de construção desenvolvido pelo governo Yugoslavo, denominado GIMS.

Sistemas fuzzy

Nos sistemas nebulosos, segundo Andreoli (2000), utilizam-se conceitos subjetivos, por meio de informações imprecisas, incertas ou vagas, para obter conclusões concretas. Andreoli (2000, p. 36) utiliza uma estrutura matemática para modelagem de: “[...] *sistemas* definidos de maneira imprecisa, sistemas pouco conhecidos, sistemas difíceis de modelar por técnicas convencionais.” Entre as aplicações de sistemas nebulosos, o autor propõe seu uso para alocação de espaços de projetos de hospitais.

Método de análise sensitiva

O método de análise sensitiva é usado na otimização de formas livres, que busca obter a tensão mínima em uma estrutura (SASAKI, 2005). É utilizado quando se quer modificar uma forma pré-concebida até se conseguir a condição estrutural mais apropriada (Figura 2.9).

Figura 2.9 Projetos que usam análise sensitiva



a)



b)

Nota: a) Centro Cultural de Kitagata, Okayama, Japão (Arata Isozaki - arquiteto; o Mutsuro Sasaki - engenheiro);
b) Island City Central Park Gringrin, Fukuoka, Japão (Toyo Ito - arquiteto; Mutsuro Sasaki - engenheiro)

Fonte: Isozaki, (2007, p. 38); Sasaki (2008, p. 87)

Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)

O Método BESO é uma evolução do método *Evolutionary Structural Optimization* (ESO). O método ESO, de acordo com Huang e Xie (2010) foi bastante estudado, com diversos trabalhos publicados sobre o mesmo (XIE, STEVEN, 1992; XIE, STEVEN, 1993). O primeiro livro em ESO (XIE; STEVEN, 1997) resume os primeiros desenvolvimentos do método. Desde então um progresso significativo foi feito no sentido de procurar melhorar o algoritmo do ESO. A partir de 1999 surgem as primeiras pesquisas em BESO, conduzidas por Yang *et al.* (1999) para otimização de peças rígidas.

O BESO é um método de geração da forma a partir da otimização do desempenho estrutural. Fundamenta-se no simples conceito de gradual remoção de material nas áreas de baixa tensão e adição nas áreas de alta tensão, resultando numa forma que evolui em busca de uma solução ótima, em termos de desempenho estrutural (HUANG; XIE, 2010). Por meio da Análise de Elementos Finitos (FEA) o BESO busca atender ao desempenho estrutural, enquanto satisfaz várias restrições, como propriedade dos materiais. Este é um método de otimização

topológica contínua, que fornece mais liberdade ao projetista para criar formas totalmente novas, que do ponto de vista estrutural, são altamente eficientes (BERNACCHI, 2010). A Figura 2.10 mostra alguns exemplos de projetos que usaram o Método BESO.

Figura 2.10 Exemplos de uso do BESO



Nota: a) Edifício de escritórios em Takatsuki, 2004, Ohmori; b) Ponte de pedestres em Melbourne BKK (arq.); c) Estação de trem de Florença, 2002 (arquiteta Arata Isozaki, engenheiro Mutsuro Sasaki)

Fonte: a, b (XIE et al., 2011); c (SASAKI, 2008, p. 103)

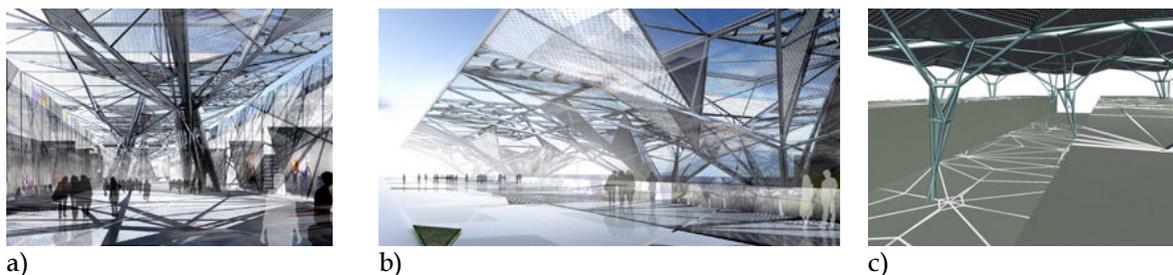
Uma maneira confiável de comprovar o uso ineficiente de materiais numa dada estrutura é mostrando que em algumas partes da mesma a tensão é baixa, o que indica que é desnecessário, do ponto de vista estrutural. Numa condição ideal o nível de tensão em qualquer parte da estrutura deveria ser constante. A partir da verificação do nível de tensão na estrutura (utiliza a FEA) o BESO estabelece um critério de rejeição de elementos da estrutura baseado no nível de tensão local: baixa tensão em uma determinada região de uma estrutura significa que nessa região o material é subutilizado e, portanto, pode ser removido da estrutura. A remoção se dá pela retirada dos elementos subutilizados de um modelo de elementos finitos. Os elementos finitos são cubinhos criados pela decomposição da forma em partes menores. Por meio da decomposição desses elementos finitos, o nível de tensão é determinado comparando a tensão de "von Mises" de um elemento com a tensão máxima de toda a estrutura. Em cada ciclo de FEA os elementos com baixas tensões de "von Mises" são removidos e os vazios perto dos elementos com altas tensões de "von Mises" são transformados em elementos sólidos (HUANG; XIE, 2010).

Método de propagação aleatória

Desenvolvido na Universidade Angewandte Kunst (Viena), esse método propõe um processo de melhorias da estrutura de uma malha por meio de posicionamentos aleatórios dos elementos da malha ao longo da estrutura. O critério usado para a avaliação da estrutura é

verificar se cada elemento está livre de momentos fletores. Por meio de um processo de iterações, atribuem-se novas posições na estrutura para os elementos detectados com forças ruins. Em seguida, a estrutura é novamente avaliada, e o processo continua com um número de iterações predefinidas ou até se chegar a um critério de desempenho desejado –Figura 2.11 (TESSMANN, 2008).

Figura 2.11 Método de propagação aleatória usado no projeto da cobertura da estação de metrô da Praça Garibaldi em Nápoles



a)

b)

c)

Nota: a e b) vistas internas; c) mdelo digital. Arquiteto Dominique Perraut; Empresa de Engenharia Estrutural Bollinger + Grohmann

Fonte: Tessman (2008, p. 107)

Structural shape annealing

Método desenvolvido por Kristina Shea, combina gramática da forma, avaliação de desempenho estrutural e otimização estocástica visando explorar a geração de treliças (Figura 2.12) de modo mais apropriado em relação ao desempenho estrutural, espacial e de custos. (SHEA; AISH; GOURTOVAIA, 2003).

Figura 2.12 Projeto Hylomorphic



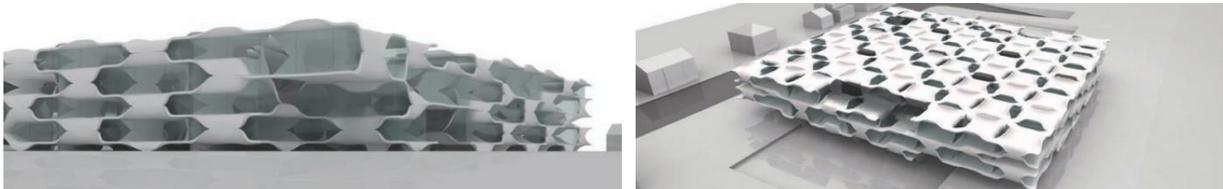
Nota: Desenvolvido no MAK Centre for Art and Architecture (Los Angeles) por K. Shea e J. Leuppi no outono de 2006

Fonte: Leuppi; Shea (2008)

Cellular Automata

As Cellular Automatas (CA), segundo Tessmann (2008), são modelos discretos constituídos por: célula, grade, situação, regra, vizinhança. Em uma grade com enes dimensões, as células podem estar em diferentes situações. Estas são definidas por regras que descrevem o comportamento das células em relação às células vizinhas. Cada célula é um autômato que permanece em mudança a partir da relação com seu lugar. Com isso, padrões estáveis ou caóticos podem surgir de modo auto-organizado (TESSMANN, 2008). Estes, segundo Tessmann (2008), são meios apropriados para exploração de sistemas complexos por meio de regras simples. A Figura 2.13 mostra o uso da CA no desenvolvimento de projeto.

Figura 2.13 Projeto de uma proposta para a Biblioteca Nacional de Praga usando CA



a)

b)

Fonte: Wortmann (2011)

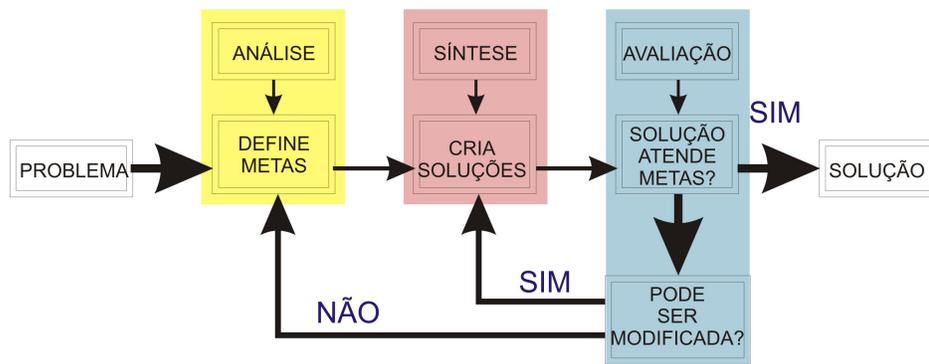
2.3.3 O uso do computador na avaliação/ previsão do projeto arquitetônico

2.3.3.1 A avaliação no contexto do processo de projeto

A avaliação é um meio de verificar se o projeto atende às condições de desempenho desejadas. Serve para testar se as soluções geradas atendem aos objetivos definidos na análise. Indica ajustes que devem ser feitos visando melhorar a qualidade geral das soluções de projeto. Os resultados da avaliação podem indicar caminhos para possibilidades de resolução de projeto, ainda não vislumbrados.

A avaliação assume um papel decisivo nas sequências de decisão (Figura 2.14), ao verificar se uma solução atendeu às metas e requisitos propostos. Apenas testando e avaliando as implicações das soluções, é possível se chegar, com segurança, ao estágio seguinte do processo de projeto. A avaliação, segundo Kalay (2004, p. 302), está relacionada “a capacidade de se prever os efeitos estéticos, ambientais, psicológicos, sociais, econômicos, e outros, que serão advindos das soluções propostas, avaliar a conveniência de tais efeitos, e tirar conclusões operacionais da avaliação”.

Figura 2.14 Representação da estrutura do ciclo de decisões do processo de projeto com suas iterações



Fonte: Adaptado de Kalay (2004, p. 302)

A avaliação é um processo complexo, composto por múltiplas fases e constituído por vários componentes integrados. Estes, segundo Kalay (2004) são: representação do modelo de dados da solução do projeto; metas de projeto; previsão de desempenho esperado; juízo e realimentação. A obtenção de modelos de dados deve ser capaz de representar a solução emergente de modo preciso e completo. Eles devem permitir extrair as características que são

mais relevantes para o processo de avaliação. As metas podem ser: externas (resistência dos materiais, códigos de edificação, normas, etc.); e internas (orçamento, número de cômodos, funcionalidade, estética, etc.). A previsão relaciona-se com conhecimentos especializados, com áreas que envolvem energia, acústica, estrutura, estimativa de custos, fatores sociais, etc. O julgamento visa obter uma avaliação do desempenho global, identificando as áreas que precisam ser melhoradas ou que devem ser revistas.

A avaliação deve contemplar diversos tipos de desempenho (energético, custo, estético, etc.) e estar presente nas diferentes fases do processo de projeto. Pela sua complexidade, o uso de métodos computacionais pode tornar a avaliação menos tediosa, possibilitando respostas mais rápidas sobre os efeitos das decisões projetuais. Com a utilização de softwares de previsão, é possível conseguir melhor adequação entre solução e objetivos de projeto. Embora muitas pesquisas tenham sido desenvolvidas, nesses últimos anos, visando o desenvolvimento de aplicativos computacionais de previsão e julgamento de diferentes aspectos de projeto, ainda existe uma lacuna na utilização desses aplicativos na prática de projeto (EASTMAN, 2009).

Os aplicativos computacionais utilizados na prática de projeto contemporânea são empregados para a avaliação de métodos de previsão das características das soluções e métodos de julgamento das soluções de projeto. Nos próximos itens, apresentam-se esses métodos e exemplos de aplicativos computacionais que os utilizam.

2.3.3.2 Métodos de previsão

A complexidade da arquitetura exige a utilização de diferentes tipos de previsão. Os métodos de previsão são aqueles utilizados para inferir e extrair as informações importantes das soluções emergentes, para serem utilizadas nos sistemas de previsão (KALAY, 2004). Alguns desses métodos são mais confiáveis, utilizam o conhecimento matemático ou certos conhecimentos científicos para fazerem uma previsão segura; outros são menos, mas podem ser mais apropriados para previsão de determinados aspectos do projeto. Cada método tem sua instrução de uso para um aspecto diferente de projeto. O importante é que seu uso esteja acompanhado de um nível de segurança que assegure a confiabilidade mínima dos resultados (KALAY, 2004).

Entre os métodos utilizados na realização de previsão, Kalay (2004) destaca os seguintes:

- cálculo - é um dos métodos mais comuns de previsão. Por usar um raciocínio matemático rigoroso, é confiável; esse é o método preferido de previsão;
- raciocínio - constitui-se de um processo de aplicação de regras combinando fatos, crenças ou observações, gerando fatos e regras; os fatos conhecidos, crenças e observações são chamados de premissas, e um novo fato derivado por meio da inferência é chamado de conclusão; com o método de raciocínio, é possível chegar a conclusões que podem ser verificadas com base em outros casos;
- simulação - é o método preferido de avaliação de desempenho em arquitetura; ocorre principalmente quando se trabalha com variáveis de decisão que são difíceis de estabelecer analiticamente, por sua complexidade, pelo fato de haver muitas delas, ou quando a experimentação de um edifício ou parte dele é muito cara ou requer muito tempo e risco; o objetivo da simulação é "validar uma hipótese - por meio de um modelo ou protótipo do artefato projetado - e descobrir consequências inesperadas da sua concepção" (KALAY, 2004, p. 326); a simulação constitui-se dos seguintes componentes: um modelo de entrada (objeto a ser testado e ambiente em que está inserido), um mecanismo de simulação e a saída, que compreende os dados de desempenho;
- extrapolação - é um método de previsão baseado em experiências similares antecedentes; por meio da comparação das condições de desempenho de uma solução similar antecedente, é possível prever as condições de desempenho das soluções novas.

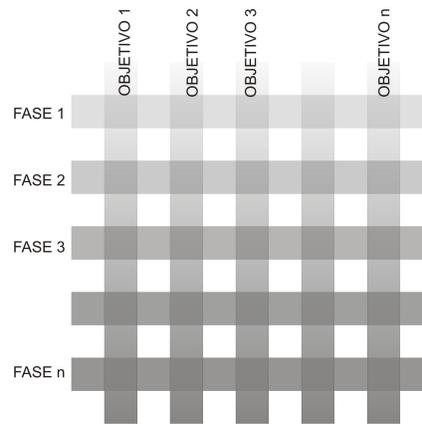
2.3.3.3 Modalidades de avaliação

O processo de síntese da solução arquitetônica compõe-se de diferentes estágios de desenvolvimento. Cada um desses estágios representa diferentes níveis de abstração e visa alcançar múltiplos objetivos de projeto. Eles podem ser expressos em duas modalidades relacionadas com a modalidade focada no desenvolvimento de uma fase da solução, composta por vários objetivos de projeto, e com a modalidade de desenvolvimento de objetivos

particulares de projeto, que ocorre entre os diferentes níveis de abstração, representado pelas fases do projeto (KALAY, 2004).

Ao considerar a existência dessas duas modalidades e tendo em conta a centralidade da avaliação no processo de projeto, Kalay (2004) mostra que a avaliação da solução de projeto passa, também, por essas modalidades. Esse autor distingue duas modalidades de avaliação: Avaliação em Multicritério e Avaliação em Vários Níveis (Figura 2.15).

Figura 2.15 Modalidades de avaliação de projeto: multicritério e em vários níveis



Nota: Multicritério envolve diferentes objetivos dentro de uma fase de projeto; vários níveis envolve diferentes fases de projeto, e visa a busca por uma solução de um objetivo de projeto

Fonte: Kalay (2004, p. 338)

Avaliação de decisão em multicritério

A modalidade de avaliação de decisão em multicritério ocorre quando se avalia uma determinada solução de projeto sobre diferentes pontos de vista simultaneamente – avaliação energética, de custo, estabilidade estrutural, por exemplo (KALAY, 2004). Essa modalidade de avaliação limita-se a uma fase do processo de projeto (estudo preliminar, anteprojeto, projeto executivo, por exemplo).

Avaliação multiníveis

O processo de projeto envolve diferentes fases, com níveis de detalhes e de informação crescentes. Durante essas fases, as avaliações das soluções precisam ser feitas em diferentes níveis de abstração. Na fase de concepção, por exemplo, o nível de informação é pouco, incapaz de permitir a realização de certos tipos de avaliação. Diferentes métodos de avaliação são

necessários em diferentes fases de projeto. Com base no nível de abstração, é definido o tipo de aplicativo de avaliação a ser utilizado para uma determinada fase (KALAY, 2004).

O principal problema em utilizar aplicativos computacionais na avaliação de multiníveis de desempenho está na dificuldade em abarcar progressivamente os níveis de informação nas diferentes fases do processo de projeto, pois em cada fase o tipo e o conteúdo da informação variam muito (KALAY, 2004). Essa dificuldade aumenta quando se trabalha com as fases iniciais do processo de projeto. Embora se tenham desenvolvido muitos aplicativos de avaliação para etapas avançadas do processo de projeto (em áreas como avaliação energética, estrutural, acústica, etc.), pouco se tem nas etapas iniciais (EASTMAN, 2009).

Propagação de restrições

A propagação de restrição consiste em avaliar os impactos de decisões de projeto ao longo das várias fases do processo de projeto. Com isso, busca-se verificar as interferências de certas decisões de projeto em outros sistemas que compõem o edifício.

2.3.3.4 Avaliação de qualidades quantificáveis e não quantificáveis

O processo de avaliação pode envolver dois tipos de qualidades, aquelas que podem ser quantificáveis e às não quantificáveis. Enquanto as primeiras são mais objetivas e estão fundamentadas por anos de pesquisa e desenvolvimento em aplicativos computacionais para dar suporte a avaliação, as não quantificáveis são mais polêmicas e envolvem algumas discussões sobre a possibilidade do computador fazer esse tipo de avaliação.

Avaliação de qualidades quantificáveis

A avaliação de qualidades quantificáveis envolve, segundo Kalay (2004), três condições: a existência de um objeto, ou uma representação desse objeto para ser avaliado; a existência de objetivos, valores de referência do nível de desempenho desejado; e a existência de um método para compará-los. Como exemplo de avaliação quantificável, cita-se a avaliação de desempenho estrutural de um edifício, avaliação funcional de um edifício (tamanho, proporção, adjacências, conectividade, etc.), avaliação de custo, avaliação de conforto térmico e acústico.

Diversos aplicativos computacionais têm sido desenvolvidos visando à avaliação de características quantificáveis do edifício. Entre as principais áreas de produção de aplicativos computacionais de avaliação, podem-se citar:

- estrutura – consiste em avaliar se os projetos são capazes de suportar a ação gravitacional, a ação do vento, as cargas sísmicas, as cargas internas do uso, etc. (entre os softwares usados nessa área, citam-se: GSA, Strand, Sofistik);
- energia – é uma das áreas que mais investiram, nos últimos anos, em aplicativos computacionais voltados para a avaliação de soluções de projeto em razão da importância dada à redução do consumo de energia no edifício (EnergyPlus, Ecotect, DesignBuilder, entre outras);
- acústica e ventilação – os aplicativos computacionais que trabalham com acústica e ventilação utilizam o conhecimento dos princípios da dinâmica de fluido para estabelecer seus estudos (Odeon, EnergyPlus, etc.);
- dimensionamento dos espaços e conflitos – avalia questões relacionadas com o uso, dimensionamento e conflito dos espaços (Solibri, Naviswork, Affinity Trelligence Affinity, entre outros).

Avaliação de qualidades não quantificáveis

A avaliação das qualidades não quantificáveis se dá para aquelas propriedades do edifício que não podem ser classificadas por valores de referência de desempenho e em que não existem métodos de comparação desses valores de referência. Essas características são, por exemplo, a estética do projeto e os fatores humanos relacionados com o ambiente do edifício. Um dos principais desafios para a implementação dessas características em aplicativos computacionais é estabelecer um meio que as torne condicionantes viáveis para avaliação.

Os fatores humanos são dos mais difíceis de prever o desempenho, pois envolvem muitas medidas subjetivas, por exemplo, percepção, ergonomia, impactos no sistema social, diferentes tipos de interpretação. Esses, segundo Kalay (2004, p. 375), “[...] descrevem as relações entre o ambiente construído e os habitantes e [...] visam descrever (e avaliar) como as pessoas

respondem e se comportam no ambiente construído, tanto em condições normais, quanto em condições de emergência”⁹. Entre os aplicativos computacionais que trabalham com avaliação de fatores humanos, podem-se citar os seguintes: *Nursing Unit Design Assistant* (NUDA); EXODUS; NAPS-PC; VUsers.

Assim como os fatores humanos a estética é outro aspecto do edifício que desafia os métodos tradicionais de avaliação. A forma mais comum de avaliar a estética é por meio de estratégias subjetivas. A utilização de métodos computacionais para a avaliação da estética pode ser abordada sob dois pontos de vista: o normativo e o descritivo. A abordagem normativa, já bem conhecida em trabalhos de grandes arquitetos, utiliza princípios de composição desenvolvidos por alguns arquitetos (Palladio, Frank Lloyd Wright, Le Corbusier, por exemplo) para formar regras que vão governar algoritmos computacionais. Uma das primeiras implementações que utilizava métodos computacionais para avaliação da estética foi desenvolvida em gramática da forma (CELANI, 2008).

A abordagem descritiva tem se baseado na análise formal do edifício para descobrir as principais regras de composição, como, ritmo, proporção, simetria, etc. Os métodos que trabalham com a abordagem descritiva dependem de uma tecnologia que identifica as características geométricas e topológicas de uma imagem (KALAY, 2004).

2.4 Os Modelos de Projetos Arquitetônicos Digitais

A prática da arquitetura, com suporte do meio digital, apoia-se no uso de tecnologias computacionais que possam executar certos papéis durante o processo de projeto arquitetônico. A evolução dessas tecnologias, aplicada ao projeto arquitetônico, explicitada nas práticas de projeto digital contemporânea, tem resultado em diversas reformulações da prática de projeto. Nesse processo, busca-se, no âmbito das discussões teóricas, colocar o projeto digital como uma forma de projeto metodologicamente única e estabelecer uma série de questões e conceitos que

⁹ No original: “[...] describes the relationship between the built environment and its human inhabitants [...]” aim is to describe (and evaluate) how people respond to and behave in built environments, under both normal and emergency conditions”.

sejam potencialmente únicos nos conteúdos teóricos do projeto digital (OXMAN, 2006, 2007, 2008a, 2008b, 2009a, 2009b).

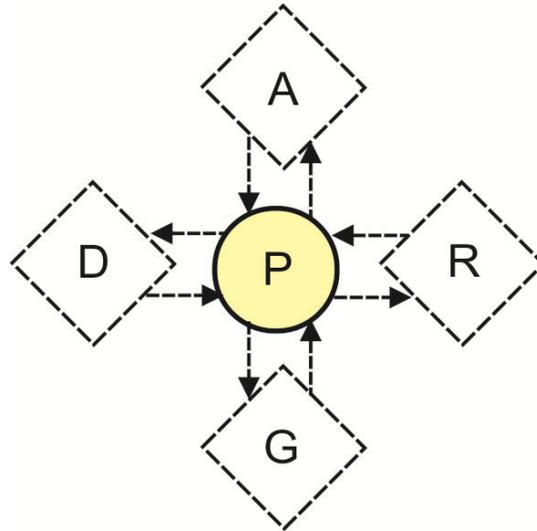
Nesse sentido, Oxman (2006) mostra que ainda não existe uma formulação teórica precisa sobre a prática de projeto digital. Para elucidar essa questão, a autora propõe uma estrutura conceitual e teórica de modelo de projeto digital. Essa estrutura, segundo a autora, funciona como um meio de revelar a sintaxe e o conteúdo dos modelos existentes de projetos digitais. Para isso, Oxman (2006) propõe uma estrutura composta por cinco modelos de projetos digitais, que são capazes de situar os novos paradigmas de projeto digital.

Por meio dessas cinco classes de Modelos de Metodologias de Projeto Digital, é possível, segundo Oxman (2006), definir e explicar os paradigmas inovadores do projeto digital. Essa estrutura também serve como um método eficiente de mapeamento de futuras implicações para novas e complexas relações entre projetistas, meio de projeto e ferramentas computacionais (OXMAN, 2006).

A estrutura usada nos modelos propostos por Oxman (2006) baseia-se nos quatro principais componentes que representam as quatro classes de atividades de projeto que são: representação, geração, avaliação e desempenho. O desempenho, segundo Oxman (2006), relaciona-se com os aspectos programáticos e contextuais, representa os critérios de desempenho definidos na análise do problema de projeto. Os modelos são configurados por meio do perfil de estruturação dos conhecimentos e das relações existentes entre o projetista e essas quatro classes de componentes de projeto. O projetista assume a posição simbólica central interagindo com os componentes (Figura 2.16).

Nessa estrutura representacional a descrição do processo cognitivo do conhecimento pode ocorrer de maneira explícita ou implícita. Do ponto de vista computacional, baseia-se na habilidade para formular, representar, implementar e interagir de maneira explícita com o conhecimento. No processo de projeto tradicional, sem o computador, em geral, a representação do conhecimento é implícita e caracteriza-se por uma perda de formalização; associa-se à intuição e à criatividade (BROADBENT, 1973).

Figura 2.16 Representação simbólica de modelo não digital de projeto



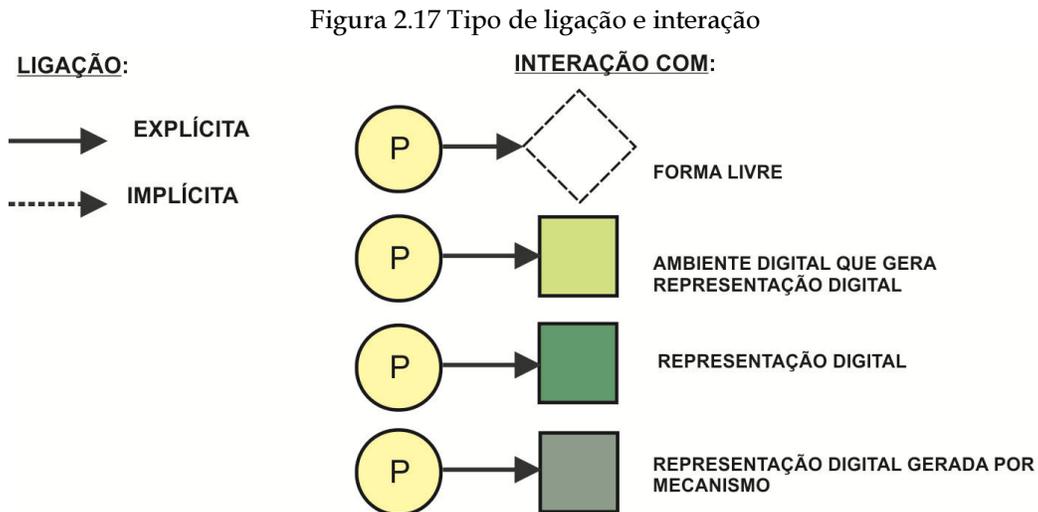
Fonte: Oxman (2006)

As relações entre o projetista e os componentes podem ser de dois tipos: por meio de ligações e de interações com os componentes. As ligações servem para a passagem da informação. As interações ocorrem com os projetistas e os componentes do projeto digital. Oxman (2006, p. 244) propõe quatro tipos de interação:

- interação com uma forma livre - ocorre no projeto não digital; nesse caso o projetista interage diretamente com a representação do objeto do projeto por meio de esboços, croquis, etc.;
- interação com uma representação digital - dá-se no projeto baseado no CAD; o projetista interage com um esboço digital, desenho digital ou modelo digital;
- interação com uma representação digital gerada por um mecanismo - nos mecanismos de geração de projeto digital; nesse caso, o projetista interage com uma estrutura digital que foi gerada por um mecanismo, de acordo com uma série de regras ou relações predefinidas;
- interação com um ambiente digital que gera uma representação digital - o projetista interage com mecanismo computacional que gera uma representação digital.

A Figura 2.17 mostra as possíveis representações dos tipos de ligação e de interação do projetista com os componentes do projeto digital. O estudo de modelos de projetos digitais, neste trabalho, fundamenta-se nessa estrutura proposta por Oxman (2006, 2007, 2008a, 2008b, 2009a, 2009b). Nos Capítulos 3, 5 e 6, volta-se a abordar essas representações simbólicas.

Por meio dessa representação simbólica, Oxman (2006) classifica os modelos de projeto digitais em: Modelo CAD (*CAD model*); Modelo Digital de Formação (*digital formation model*); Modelo de Projeto Generativo (*generative design model*); Modelos de Desempenho (*performance model*); Modelo Composto (*compound model*).



Fonte: Autoria própria com base em Oxman (2006)

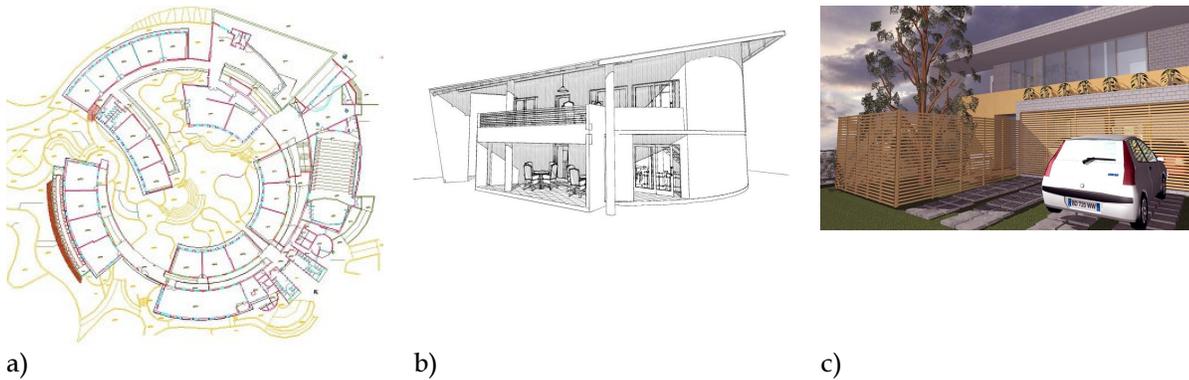
2.4.1 Modelo CAD

O modelo CAD baseia-se nos modelos de CAD convencionais. Representa a transição do processo de projeto baseado no papel. Oxman (2006) propõe três subclasses desse modelo: Modelo CAD Descritivo, Modelo CAD Descritivo com processo digital bidirecional e Modelo CAD para Avaliação.

2.4.1.1 Modelo CAD Descritivo

Representa o modelo CAD tradicional. Caracteriza-se pelo uso de uma representação formal bi ou tridimensional. É um modelo descrito, pois, mediante o uso de representações do desenho, modelagens geométricas e renderização, serve para descrever uma representação gráfica do projeto digital. Caracteriza-se por: emprego de softwares de representação, de modelagens e de renderização geométrica; pela capacidade de manipular uma representação gráfica de objetos. Nesse modelo o projetista interage com um desenho digital, um esboço digital ou um modelo digital (Figura 2.18).

Figura 2.18 Representações usadas no Modelo CAD Descritivo



a) Nota: a) Desenho digital: planta baixa de projeto arquitetônico desenvolvido em ferramenta CAD; b) Maquete eletrônica; c) Imagem rederizada de modelo digital de informação do edifício

Fonte: Autoria própria

2.4.1.2 Modelo CAD Descritivo com processo digital bidirecional

Esse modelo, apesar de ter características semelhantes ao anterior, diferencia-se pelo uso de um processo bidirecional de relação entre modelo físico e digital. Modelos físicos podem ser gerados de modelos digitais usando-se técnicas de prototipagens (SASS; OXMAN, 2006; PUPO; CELANI, 2008). Modelos digitais podem ser gerados de modelos físicos por meio de escaneamento (CELANI; CANCHERINI, 2009). Esse processo bidirecional é, de acordo com Oxman (2006), reconhecido como um processo metodológico muito utilizado por Frank Gehry, com significativos desenvolvimentos, mesmo na etapa conceitual (Figura 2.19a, b e c).

Figura 2.19 Representações utilizadas por Frank Gehry para o projeto do Walt Disney Concert Hall



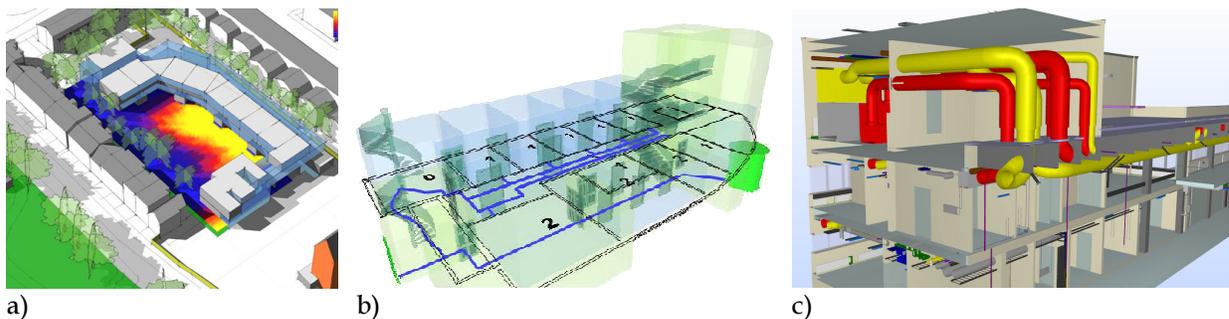
a) Nota: a) croquis; b) maquete física; c) foto da fachada externa

Fonte: a, b - <<http://jdez7.blogspot.com/2009/09/independant-study-walt-disney-concert.html>>; c - Autoria própria

2.4.1.3 Modelo CAD para Avaliação

Essa subclasse do Modelo CAD, de acordo com Oxman (2006), caracteriza-se por um processo que, além do desenho, modelagem ou renderização, incorpora a capacidade de realização de avaliação do modelo. Por meio do uso de parâmetros e regras de checagens em modelos constituídos por geometrias, materiais e outras propriedades (modelos "tipados" ou "semitipados"), é possível estabelecer avaliações baseadas em análises e simulações automáticas de diversas naturezas no modelo (Figura 2.20), por exemplo, estrutural, ambiental, custo, etc. (EASTMAN, 2009). Em geral, baseiam em ferramentas BIM. Este modelo suporta processos colaborativos entre equipes de projeto e incorpora o aspecto previsivo (avaliação do que pode acontecer) ao aspecto representativo do Modelo CAD. Por ser um processo automático entre representação e avaliação, apresenta uma ligação explícita entre eles, componentes do projeto digital.

Figura 2.20 Exemplos de projetos usando o Modelo CAD para Avaliação



a) Nota: a) simulação de zonas de calor; b) checagem da qualidade do fluxo do edifício; c) checagem de conflitos

Fonte: a - <<http://www.sustainablebydesign.co.uk/Latest%20news.html>>; b, c - <<http://www.solibri.com/>>

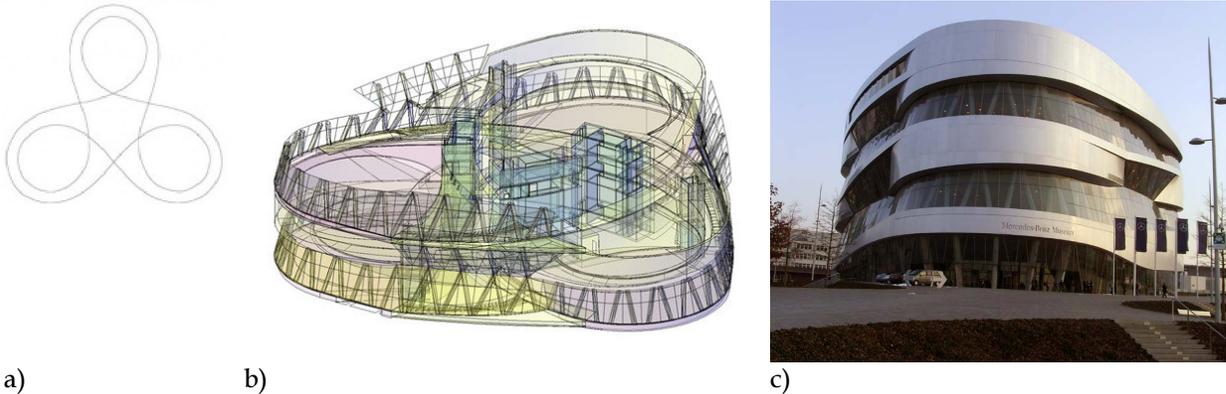
2.4.2 Modelo de formação

O conceito de formação associa-se, segundo Oxman (2007), a uma radical mudança de uma manipulação gráfica da educação formal e da representação sintática, para um processo relacionado com a dinâmica e heterogeneidade das versões topológicas, que vai além de uma variação dimensional. Nesse contexto, o Modelo Digital de Formação associa-se à emergência, por meio de técnicas digitais de capacitação, que substituem as estruturas tradicionais de representação explícitas dos modelos CAD. O projetista utiliza técnicas como script, que interagem e operam uma lógica não determinada pelo ambiente de geração, resultando na emergência de um projeto não determinístico. Mesmo assim, técnicas de capacitação digital, existentes nesse modelo, dão ao projetista uma alta capacidade de interação e controle do ambiente digital (OXMAN, 2006). Esse modelo associa-se ao uso de duas técnicas: a modelagem paramétrica e a animação (OXMAN, 2008a). Caracteriza-se pelas seguintes subclasses: Modelo de Formação Associativo (*associative design formation model*) e Modelo de Formação Baseado em Movimento (*motion-based formation model*). Em ambos, a topologia assume um papel fundamental.

2.4.2.1 Modelo de Formação Associativo

Baseia-se no uso de técnicas de modelagem paramétrica que exploram geometrias associativas (OXMAN, 2006) e se associa ao conceito de "variações topológicas" (OXMAN, 2008a). Diferentes configurações geométricas podem ser criadas alterando-se apenas os valores dos parâmetros. Explorações paramétricas de geometrias associativas descrevem relações entre objetos (Figura 2.21a, b, c), estabelecendo interdependências e comportamentos de transformação de objeto (OXMAN, 2008a).

Figura 2.21 Técnicas de modelagem paramétrica na geração da forma do Museu Mercedes-Benz, Stuttgart

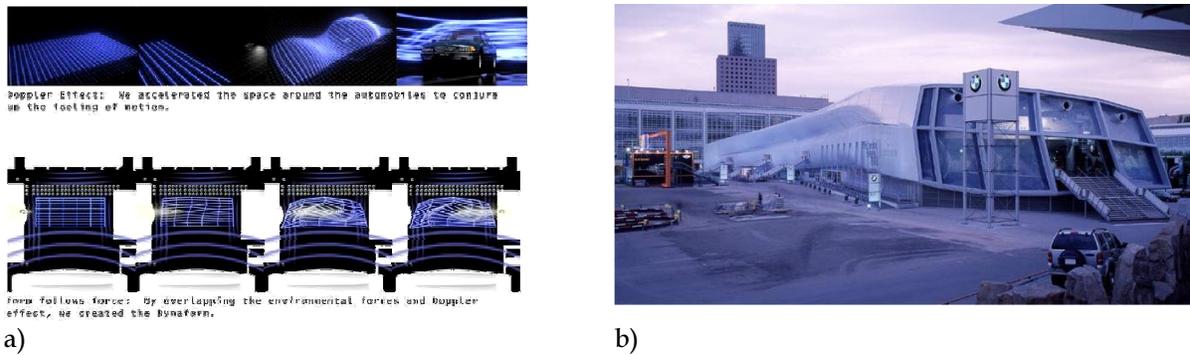


a) b)
 Nota: a) trifóido; b) forma do museu baseado no trifóido; c) vista externa
 Fonte: a, b - Aranda; Lasch (2008, p.170); c - autoria própria

2.4.2.2 Modelo de Formação Baseado em Movimento

A formação associa-se à animação e à introdução do conceito de “projeto dinâmico” (*dynamic design*). Nesse caso, o projetista não interage diretamente como o meio representacional. A interação de projeto se dá dentro de uma estrutura interativa de meio de animação que gera a forma (Figura 2.22).

Figura 2.22 Técnica de animação utilizada no projeto do Pavilhão da BMW para mostra internacional de motores – Frankfurt 2001



a) b)
 Nota: a) estudos da geração da forma no túnel de vento; b) vista externa do pavilhão
 Fonte: Kolarevic e Malkawi (2005, p. 146)

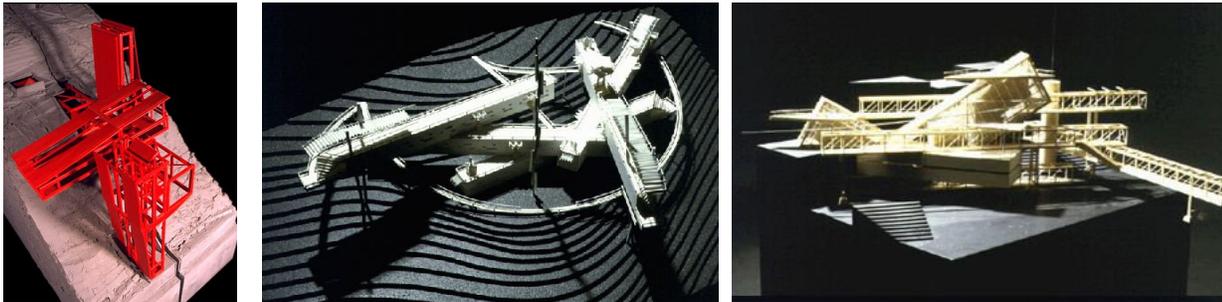
2.4.3 Modelo generativo

O modelo de projeto generativo caracteriza-se por processos de geração baseados em mecanismos computacionais. Diferentemente do modelo anterior, espaços e formas são resultados de um processo de formação pré-formulados. Projetistas interagem com mecanismos complexos que tratam da emergência da forma derivada de regras de geração, relações e princípios. Esse modelo constitui-se por duas principais subclasses: Modelo Gramaticamente Transformativo (*grammatical transformative design model*) e Modelo Evolucionário (*evolutionary design model*).

2.4.3.1 Modelo Gramaticamente Transformativo

Associa-se à gramática da forma (Figura 2.24 a, b). Regras de forma são delineadas por parâmetros que se relacionam com contextos específicos e formas predefinidas (OXMAN, 2008a).

Figura 2. 23 Exemplos de gramática da forma em trabalhos de alunos (Terry Knight, Escola de arquitetura e planejamento, MIT)



a) Nota: a) Memorial aos trabalhadores da mineração (Michael Wilcox); b) "Fallen Towers" Museu em San Gimignano, Itália (Randy Brown); c) Observatório oceânico e estabelecimento de ensino (Randy Brown)

Fonte: <<http://www.mit.edu/~tknight/IJDC/>>

2.4.3.2 Modelo Evolucionário

A forma emergente nesse tipo de modelo se associa a um processo evolucionário (Figura 2. 24a, b). A evolução da forma é resultado de um código genético interno que substitui a

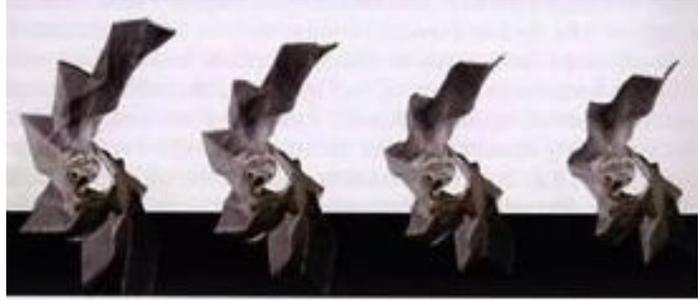
interação com a forma em si. Associa-se a regras da natureza como crescimento, mutação e evolução (OXMAN, 2008a).

Figura 2. 24 Exemplos de usos de projetos que usaram métodos baseados em Modelo Evolucionário



a)

Nota: a) Serpentine Gallery Pavillion, Londres (2002); b) Modelo evolucionário de Frazer (2005)



b)

Fonte: a: <http://www.habitable.co.uk/architecture/serpentine-gallery-pavilion-annual-temporary-structure> (2008) ; b: Frazer (2005)

2.4.4 Modelo de desempenho

O Modelo de desempenho baseia-se num processo de formação que é guiado por uma condição desejada de desempenho (OXMAN, 2008a). Utilizam tecnologias que suportam a geração da forma, em função condições desejáveis de desempenho. A forma é otimizada, transformada ou gerada de acordo com as condições de desempenho desejadas. Constitui-se por duas subclasses: Modelo de simulação baseado no desempenho (*performance-based formation model*) e Modelo de geração baseada no desempenho (*performance-based generation model*).

2.4.4.1 Modelo de simulação baseado no desempenho

Ocorre quando simulações digitais de forças externas são aplicadas guiando o processo de formação (OXMAN, 2008a). Mediante técnicas computacionais, baseados, por exemplo, em programas de simulação, busca-se modificar a forma por meio da otimização de determinados critérios de desempenho do edifício. As técnicas são utilizadas para modificar, transformar, otimizar uma forma (Figura 2.25). O projetista nesse tipo de modelo interage com partes operativas de um mecanismo que gera representação digital (OXMAN, 2006).

Figura 2.25 Exemplos de uso do modelo de simulação baseada no desempenho



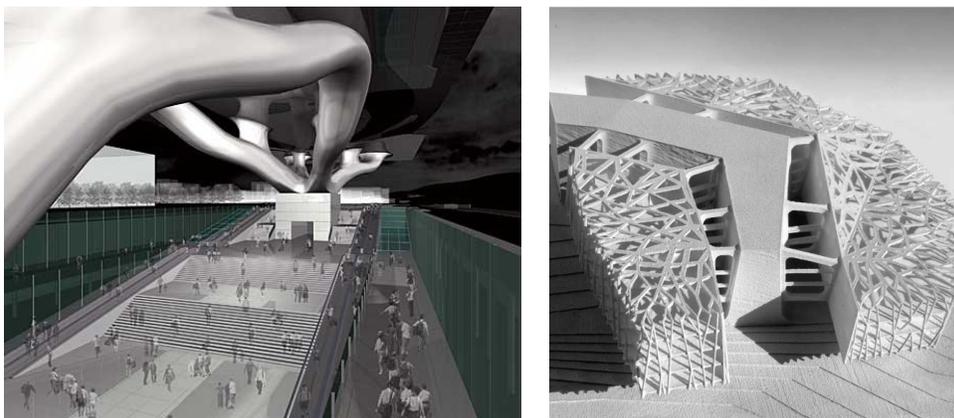
a) Nota: a) AAMI Park Stadium, Melbourne; b) Greater London Authority, Londres

Fonte: a - <<http://www.coxarchitecture.com.au/>>; b - autoria própria

2.4.4.2 Modelo de geração baseada no desempenho

Constitui-se em um processo de geração guiado por desempenho e integrado a um processo de formação. As forças aparecem como elemento principal na criação da forma (*form-making*) no projeto digital (OXMAN, 2006). Projetistas interagem diretamente com três componentes do projeto digital, definindo as forças, interagindo com componentes computacionais que geram a forma e as representam. Neste modelo, o desempenho é o motor da geração da forma (Figura 2.26).

Figura 2.26 Exemplos de uso de modelos de geração baseado no desempenho



a) Nota: a) Projeto da nova estação de metrô de Florença, 2003; b) Projeto da Nova Biblioteca Nacional Tcheca, Praga, 2006.

Fonte: Sasaki (2008, p. 103); Hensel; Menges (2008, p. 107) respectivamente

2.4.5 Modelo composto

O Modelo Composto baseia-se num processo integrado que inclui formação, geração, avaliação e desempenho. É um modelo, que, de acordo com Oxman (2006), aparece como uma classe paradigmática de modelo de projeto digital. Por ser um modelo muito abstrato desvinculado da prática de projeto digital contemporâneo, representa uma especulação de possível encaminhamento de um projeto digital no futuro. Em virtude desse último modelo ser apenas especulativo, não é citado em outros textos de Oxman (2007, 2008a, 2009a, 2009b).

2.4.6 Considerações sobre os modelos

Com base na maneira como o projetista interage com os componentes do projeto digital, os quatro primeiros modelos de projeto digital propostos por Oxman (2006) elucidam os processos de projeto da era digital, possibilitando classificar a produção da arquitetura digital não pela forma, geometria, material ou outras características inerentes ao produto, mas pela maneira como o projetista se relacionava com os componentes do projeto digital durante a síntese arquitetônica.

Técnicas como o seccionamento, tecelagem, contorno, formação (IWAMOTO, 2009), assim como tantas outras, já citadas neste trabalho, podem ser utilizadas na geração de diferentes formas arquitetônicas. A técnica em si ou o produto da técnica não são suficientes para compreender a natureza do problema, os conceitos e os métodos relacionados com a resolução do problema de projeto. Por outro lado, ao estudar o projeto digital à luz dos modelos digitais apresentados acima, torna-se mais fácil compreender a natureza do problema e dos motivos impulsionadores das respostas arquitetônicas para os problemas. Compreender o uso de métodos, técnicas e ferramentas à luz de como os projetistas interagem com os componentes do projeto digital é um modo seguro para o entendimento das estruturas de projeto digital; especialmente aquelas concebidas sob a égide do desempenho. Essas últimas serão discutidas e aprofundadas no próximo capítulo.

2.5 O Novo Estruturalismo e as Mudanças no Processo de Projeto de Arquitetura e Engenharia

Para finalizar este capítulo, é importante estabelecer algumas considerações sobre alguns tópicos que vão auxiliar na compreensão da revisão das estruturas projetuais, com o advento do projeto digital. Tópicos como construção, tecnologia da informação, colaboração entre arquitetos e engenheiros, forma, estrutura, matéria, força, desempenho e projeto digital serão discutidos sinteticamente à luz de autores como Pedreschi (2008), Bollinger, Grohman e Tessmann (2008), e Oxman e Oxman (2010).

2.5.1 Forma, força e estrutura

Baseado nos trabalhos de projetistas como Robert Maillart, Pier Luigi Nervi, Eduardo Torroja, Felix Candela, Heinz Isler e Eladio Dieste, Pedreschi (2008) discute mudanças conceituais e metodológicas significativas que têm ocorrido na relação entre forma, forças e matéria.

Pedreschi (2008) descreve o início do século XX como um período especial na história da forma estrutural e arquitetônica, com a consolidação do uso do concreto armado. A partir desse período, os projetistas percebem o grande potencial em usar o concreto, como substância plástico-líquida e amorfa, para qualidade de encontrar a forma, utilizando-se superfícies complexas, como dupla curvatura. À proporção que os projetistas estudavam novos materiais, eles incorporavam um desejo de expressão e eficiência estrutural, introduzindo uma solução conjunta de forma, força e arquitetura (PEDRESCHI, 2008).

Ao longo da primeira metade do século XX, vários projetistas procuraram explorar novos materiais e oportunidades de criação de formas estruturais. Muitos desses trabalhos vêm simbolizar o conceito de “arte estrutural” (PEDRESCHI, 2008). Nesse contexto, Angerer (1961 *apud* PEDRESCHI, 2008) cria uma classificação de estruturas particulares do século XX, que chama de “estruturas de superfície”, a qual contrapõe a classificação histórica de estrutura. “Estrutura de superfície” corresponde à coincidência de espaços interiores e exteriores de modo

que a forma pode ser lida de dentro ou de fora, e é expressa nas construções em casca (PEDRESCHI, 2008).

Com base na experiência e observação, muitas estruturas inovadoras dessa época são projetadas de modo empírico, apoiadas na intuição do comportamento da estrutura, da ação da estrutura e da adequação da estrutura. A conciliação entre intuição e análise estrutural aparece como uma característica de muitas dessas estruturas inovadoras do século XX. Concebida inicialmente como abstração de comportamento e ação, é conciliada adequando-se a certos propósitos (PEDRESCHI, 2008).

Uma das conciliações importantes é entre forma estrutural e forças. Muitas das pesquisas na área iniciaram-se no século XVII com o estudo da catenária. Esses estudos permitiram estabelecer métodos gráficos que forneciam uma correspondência direta entre força em uma estrutura e a geometria da estrutura em si. Com isso, foi possível criar uma ferramenta de desenho que permitiu um rápido desenvolvimento e refinamento da forma de modo que se pudesse controlar a força em si ou manipular a geometria da força em si (PEDRESCHI, 2008).

A relação entre força, forma e geometria possibilitou a produção de muitos projetos icônicos, principalmente na primeira metade do século XX, incorporando o senso de economia, funcionalidade e estética na produção da arquitetura.

Enquanto a primeira metade do século XX caracterizou-se pela inovação formal relacionado com o uso do concreto armado e alguns outros novos materiais, no fim do século XX e início do XIX, a grande inovação formal esteve relacionada com o uso do computador para descrever estrutura e forma (PEDRESCHI, 2008). Por meio do uso do computador, foi possível chegar a uma grande variedade de opções de projeto e de produção (VOLLERS, 2001).

Para Pedreschi (2008), a grande diferença entre a geração da forma usando o computador e um processo de encontrar a melhor estrutura é que no primeiro é possível a criação da forma sem uma predefinição, sem uma condição geométrica de destaque. Com o computador, é possível traduzir uma superfície de um volume abstrato diretamente para um mapa digital de superfície, mesmo não sendo necessariamente a mais eficiente em termos puramente estruturais ou econômicos (PEDRESCHI, 2008, p. 19). A estrutura deixa de ser a questão determinante do processo de geração da forma; em vez disso, torna-se um facilitador útil. Ocorre, nesse momento, uma disjunção entre o que é pragmático e o que é possível. Porém, isso não significa

que os novos processos de geração da forma tenham perdido a ideia da estrutura e da forma baseada nas leis da natureza, mas sim que ocorrem inversões entre as relações entre forma, forças, estruturas, matérias e desempenhos.

2.5.2 Forma, força e desempenho

Para Bollinger, Grohmann e Tessmann (2008), mas que satisfazer a formulações gerais, o projeto de estrutura deve fornecer uma resposta única para requisitos específicos e situações particulares de cada projeto. Para eles, a estrutura não pode ser pensada como tipologias predefinidas ou concebidas como variações de tipos particulares. A forma nunca pode constituir-se na configuração ótima se derivada apenas de um processo de encontrar a forma como único fator para se chegar a uma solução ótima, mas sim quando incorporar e integrar múltiplos parâmetros. Nesse processo, a estrutura é apenas um aspecto do projeto entre muitos outros, e não apenas o fator de definição da forma (BOLLINGER; GROHMANN; TESSMANN, 2008).

De acordo com esses autores, o projeto arquitetônico precisa incorporar complexos requisitos funcionais e organizacionais, e, desse modo, constituir-se de um processo sistemático de negociação de condições e requisitos de análises, assim como de geração e avaliação de possíveis respostas, por meio de processos iterativos que podem exigir análises específicas ou ajustes de definições prévias de objetivos de projetos.

Nesse contexto, Bollinger, Grohmann e Tessmann (2008) compreendem o projeto como uma rede de nós interdependentes. Essa rede procura apoiar-se num estado de equilíbrio de várias influências que buscam um desempenho integral do edifício e de sua estrutura. Essa busca não pode ser alcançada utilizando-se apenas um parâmetro de otimização para um projeto arquitetônico complexo, mas sim por meio de uma estratégia integrada de otimização dentro de uma complexa rede de critérios de projeto.

Arquitetura como um processo de estratégias evolucionárias depende da definição dos principais critérios de desempenho que vão servir como mecanismo de controle e condução do desenvolvimento da solução. A definição desses critérios, de acordo com Bollinger, Grohmann e Tessmann (2008), é algo crítico para a qualidade do edifício e de sua estrutura, na proporção em

que controla os caminhos do processo evolucionário. Por meio da integração desses critérios, dentro de uma complexa rede de requisitos, é possível chegar a um edifício e a uma estrutura que seja diferenciada em termos de desempenho. Nesse contexto, o uso de métodos e técnicas de geração tem repercutido diretamente na relação entre forma, estrutura e desempenho estrutural.

Bollinger, Grohmann e Tessmann (2008) acrescentam que hoje, com os métodos evolucionários digitais, o processo de geração da forma não se limita à disponibilidade de métodos de cálculos e análises; também considera o desenvolvimento de métodos que simulem as soluções. Assim, torna algo semelhante aos métodos empíricos presentes nos projetistas do início do século XX, quando desenvolveram estruturas com base em experiências e observação de construções existentes.

2.5.3 Material, estrutura e forma: novo estruturalismo

Ao abordar tópicos como forma, força, estrutura e desempenho, Oxman e Oxman (2010) propõem uma reversão na tradicional sequência da engenharia arquitetônica, que é definida por um desenvolvimento sequencial entre forma, estrutura e material, para um processo constituído pela sequência material, estrutura e forma; em vez de a forma ser concebida pelo arquiteto e subsequentemente estruturada e materializada; por meio da expansão da tecnologia digital e da colaboração entre arquitetos e engenheiros estruturais, Oxman e Oxman (2010) mostram que ocorre uma inversão para um processo projetual caracterizado por material, estrutura e forma. Essa mudança de cultura foi denominada por Oxman e Oxman como *Novo Estruturalismo (New Structuralism)*.

O desenvolvimento de novas estruturas complexas em que os métodos tradicionais de engenharia estrutural não são capazes de resolver, nos últimos anos, tem resultado no aumento da colaboração entre arquitetos e engenheiros estruturais. Como resultado, tem-se novos processos definidos por novas relações entre os modelos formais dos arquitetos e processos de materialização da engenharia (OXMAN; OXMAN, 2010).

Esses novos processos têm sido postos em voga por uma geração de novos engenheiros estruturais que respondem a novas responsabilidades profissionais, incorporando novas tecnologias arquitetônicas dentro de novos processos de projeto. Nesse contexto, a atuação do

engenheiro estrutural deixa de ser *a posteriori* e aparece já nos primeiros estágios do processo de geração da forma, trazendo à tona os conteúdos de projetos relacionados com a materialização e tecnologias de fabricação (OXMAN; OXMAN, 2010).

Uma das características dessa engenharia de vanguarda está na aproximação entre a otimização dos projetos estruturais e dos conceitos arquitetônicos. A habilidade do projeto de engenharia em considerar o material, já nos primeiros estágios do processo de projeto, aparece, para Oxman e Oxman (2010), como um dos meios mais apropriados de colaboração entre engenheiros e arquitetos e algo que deve ser considerado no projeto arquitetônico.

Nesse contexto, Holm e Kjeldsen (2008) propõe uma abordagem contemporânea para a disciplina de projeto de engenharia. Nessa abordagem destaca-se a importância em tratar a complexidade não linear, desenvolver o conhecimento em matemática e em princípios geométricos de estruturação e padronização como parte das novas exigências em [de] conhecimento em projeto.

A abordagem do *Novo Estruturalismo* dentro do contexto do projeto de engenharia e sua relação com o projeto arquitetônico apresenta como principais características integrar: estruturação, tectônica digital, materialização, produção e pesquisa (OXMAN; OXMAN, 2010).

2.5.3.1 Estruturação

A estruturação, de acordo com Oxman, Oxman (2010), é o processo caracterizado por uma relação única das partes com o todo que ocorre entre os elementos da arquitetura. É um processo em que padrões formalizados de estrutura e pesquisa em estrutura fornecem um conhecimento geral de um potencial de configuração para uma capacidade de transformação evolucionária, munida de atributos geométricos como heterogeneidade ou diversidade. A resultante tectônica digital pode ser parametricamente representada por transformações de um padrão de configuração. Essa utiliza a modelagem tridimensional para fornecer as bases geométricas e topológicas para a descrição desses princípios de classes evolucionárias.

Além de um conteúdo teórico, caracteriza-se por uma lógica matemática, geométrica, sintática e formal que se integra em uma tectônica digital. Por meio da estruturação, técnicas de fabricação digital, por exemplo, seccionamentos, tecelagem, dobraduras, contornos, e formação (IWAMOTO, 2009), podem ser mediadas em um sistema que seja generativo e potencialmente

diferenciado. Com a estruturação tectônica e sua representação digital, é possível se ter a base representacional compartilhada para arquitetos e engenheiros colaborarem. Essa base tectônica serve como representação geométrica, bem como para análises de desempenho e procedimentos de síntese da engenharia estrutural.

2.5.3.2 Tectônica digital

Tectônica digital, de acordo com Oxman e Oxman (2010), é a coincidência entre a representação geométrica da estruturação e o software que o modula. Por meio dessa, topologias estruturais podem ser moduladas utilizando-se a codificação de topologias paramétricas. A tectônica digital utiliza-se de programas de script como meio de projeto para a estruturação. O script é usado para produzir representações geométricas em uma topologia de padrões e estruturas.

Uma geometria associativa pode possibilitar uma abordagem de projeto, geométrica e tectonicamente definida por uma relação de dependência como base para um processo de projeto que seja generativo e evolucionário, definindo uma morfogênese. Essa, por sua vez, constitui-se na derivação da solução de projeto por meio de processos generativos e performativos. Nos casos dos processos performativos, dados de desempenho podem guiar a morfogênese (OXMAN; OXMAN, 2010).

2.5.3.3 Estruturação da materialidade

A estruturação da materialidade relaciona-se com a fabricação e construção digital. A ideia é que a estrutura material integre o conceito de estruturação, o comportamento do material e a tectônica digital. O estudo da estrutura do material e seu papel no projeto e no projeto digital aparecem como um assunto fundamental na área. A pesquisa e o entendimento do material usado no projeto, a habilidade em projetar com esse material e com técnicas de manipulação da representação das estruturas materiais por meio de tectônicas digitais tem-se tornado um ponto fundamental no conhecimento arquitetônico (OXMAN; OXMAN, 2010).

2.5.3.4 Fabricação da materialidade

A fabricação da materialidade consiste no processo de preparação para a fabricação e a construção. Muitas vezes, associa-se ao reúso de códigos digitais. Os dados tectônicos do projeto digital aparecem como informação que flui para o processo de fabricação e construção. Num sentido inverso, também é possível que a tectônica do sistema material seja usada para guiar o processo de projeto, em uma ótica do desempenho do material orientando a geração da forma (OXMAN; OXMAN, 2010).

2.5.3.5 Projeto como pesquisa

No contexto definido pela estruturação, tectônica digital, morfogênese digital, materialidade, fabricação e projeto performativo, a atividade de projeto torna-se essencialmente relacionada com a pesquisa e um processo de produção do conhecimento comum entre engenheiros e arquitetos (OXMAN; OXMAN, 2010). Esse processo coincide com o surgimento de diversos grupos interdisciplinares em escritórios como ARUP (Arup Advanced Geometry Unit - AGU), Buro Happold (SMART Solution Group), Foster (Specialist Modelling Group - SMG), entre outros.

2.5.3.6 A reengenharia do projeto e seus impactos

Por meio das características descritas acima, que definem o conceito de Novo Estruturalismo, Oxman e Oxman (2010) mostram que o projeto de engenharia aparece como um novo modelo de método de engenharia e prática. Também funciona como um modelo geral de projeto que servem tanto para arquitetos como para engenheiros estruturais (OXMAN; OXMAN, 2010). Aparece como uma primeira tentativa de definir teorias emergentes, métodos, tecnologias em projeto, prática e educação por meio da incorporação da lógica estrutural do projeto de engenharia e das tecnologias emergentes.

Nesse novo contexto, estruturação, script e fabricação dos sistemas da matéria tornam-se áreas do estudo de projeto e base do conhecimento profissional comum entre arquitetos e engenheiros estruturais. O campo profissional muda com a necessidade de incorporação de

novos conhecimentos relacionados com a geometria arquitetônica, habilidade em programação computacional e fabricação digital (OXMAN; OXMAN, 2010).

O novo estruturalismo tem como foco novos processos de projeto caracterizados pelo uso de uma arquitetura do material. Com o advento das tecnologias de fabricação, os atuais impactos do material sobre a forma arquitetônica têm-se tornado uma das principais influências no projeto arquitetônico, movendo a cultura do projeto de um formalismo exacerbado para uma prática motivada, *a priori*, por conceitos estruturais e materiais e no qual a estruturação constitui a base generativa do projeto (OXMAN, N., 2010).

Nessa nova realidade, os estudos dos comportamentos dos materiais e suas respostas para estímulos externos podem contribuir substancialmente para uma abordagem de projeto orientado ao desempenho (HENSEL; SUNGUROGLU; MENGES, 2008). O caráter integral da articulação do material implica que, quando há mudanças na escala molecular ou em outras escalas de articulação do tecido, podem ocorrer grandes impactos no desempenho e na aparência da forma de um objeto. Variabilidade e diferenciação podem tornar então desejáveis quando a diferenciação ocorrer por meio de várias escalas de magnitude e trouxerem impacto ao desempenho e à forma (OXMAN, N., 2010).

A integral relação entre o processo de formalização e materialização baseada na interação do material com o ambiente poderá implicar os mais profundos impactos na disciplina da arquitetura e no ambiente humano fornecendo um estimulante, performativo e belo cenário para o abrigo humano (HENSEL; SUNGUROGLU; MENGES, 2008). Nesse cenário, a relação entre forma e material, muitas vezes limitada em razão da ideia de liberdade formal, será entendida como um grande potencial para a experimentação formal apoiada na capacidade de respostas dos materiais, sua mutabilidade e seus possíveis efeitos na forma arquitetônica.

2.5.4 Da forma para a matéria

A abordagem do *novo estruturalismo* em processo de projeto relaciona-se essencialmente com a etapa de concepção e geração da forma. A forma deixa de ser o ponto de partida da geração e – por meio de um processo colaborativo entre arquitetos e engenheiros estruturais, apoiados em uma tecnologia digital – passa a ser o material e a estrutura. Nesse contexto, o

desempenho passa a ter um peso progressivamente maior, muitas vezes, orientando a morfogênese digital. Nessa, os dados de desempenho guiam os processos de projeto evolucionários, definindo a forma pelas características, como o material. Um dos exemplos mais emblemáticos dessa prática está nos trabalhos de Mutsuro Sasaki (2005; 2008), por meio do uso de métodos de projeto, em parceria com arquitetos, por exemplo, o *Sensitive Analysis* e o *Bi-directional Evolutionary Structural Optimization*.

A geração da forma, nesse contexto, passa a ser diretamente influenciada pelo meio digital que, mediante parâmetros definidos colaborativamente entre os projetistas, orienta e define a forma. A prática do projeto baseada no computador assume um papel fundamental, deixando de ser mero instrumento de representação e passando a ter um peso ativo como agente no processo de geração da forma.

2.6 Considerações Finais

Neste capítulo realizou-se uma extensiva revisão bibliográfica em processo de projeto analógico e digital. Iniciou-se com a caracterização dos processos e métodos de projeto arquitetônico, discutiu-se sobre as fases do projeto arquitetônico e apresentaram-se alguns dos principais métodos de solução de projeto. Em projeto digital, abordaram-se as gerações do projeto digital e apresentaram-se experiências em que o computador é usado nas fases do projeto arquitetônico. Abordaram-se os principais modelos digitais, finalizando-se com a discussão sobre o novo estruturalismo como reversão no modo de pensar o processo de geração da forma. É nessas bases conceituais em que este trabalho se apoia para discussão, análise e proposição de Estrutura Conceitual que serão fundamentais para a compreensão do Modelo de Projeto Performativo.

O próximo capítulo abordará mais profundamente modelos de projeto baseado no desempenho, suas principais características e impactos de seu uso no processo de projeto.

3 PROJETO DIGITAL BASEADO NO DESEMPENHO

3.1 Introdução

O recente desenvolvimento da prática de projeto digital tem resultado em mudanças significativas nos métodos tradicionais de projeto, com revisão das teorias, metodologias, processos de produção e de certos conceitos, por exemplo, o conceito de desempenho. Essas mudanças implicam uma reorientação nos domínios de conhecimento do projetista, no emprego de novas tecnologias vinculadas ao processo de projeto e na redefinição do papel e das atividades dos profissionais de projeto.

Visando mapear essas mudanças no processo de projeto digital baseado no desempenho, este capítulo investiga os principais conceitos relacionados com o projeto digital baseado no desempenho, os modelos de projeto digital baseado no desempenho, o múltiplo desempenho, a relação deles com análises de decisão de multicritério e as implicações do Projeto Performativo para a prática contemporânea de projeto digital.

3.2 O Desempenho

O termo desempenho, num sentido mais amplo, associa-se ao conceito de competência e ou eficiência a ser alcançada (FERREIRA, 2004). Segundo a Associação Brasileira de Normas

Técnicas (2008, p. 5), NBR 15575-1, o desempenho é o “comportamento em uso de um edifício e seus sistemas”. Em arquitetura, desempenho é uma das palavras mais utilizadas, ainda que, por vezes, mal usadas e abusadas. O modo como o desempenho é compreendido em arquitetura é geralmente contraditório e o significado, muitas vezes, associa-se a temas divergentes (KOLAREVIC, 2005). O conceito de desempenho pode assumir diferentes significados, abrangendo diversos domínios, que vão além dos estéticos ou puramente técnicos (estrutural, térmico, acústico, etc.). Esse conceito teve um crescimento de interesses nos últimos anos, principalmente, em virtude do desenvolvimento tecnológico, das mudanças culturais e a emergência da sustentabilidade como uma questão essencial de projeto (KOLAREVIC, 2005).

O desempenho do edifício sempre foi uma questão fundamental de projeto. No contexto do processo de projeto, o desempenho representa vários papéis e tem muitas implicações. O desempenho no projeto tradicionalmente associa-se ao ato de avaliação. Avaliações por simulação são um tipo de avaliação de desempenho esperado de uma solução de projeto arquitetônico (KALAY, 2004).

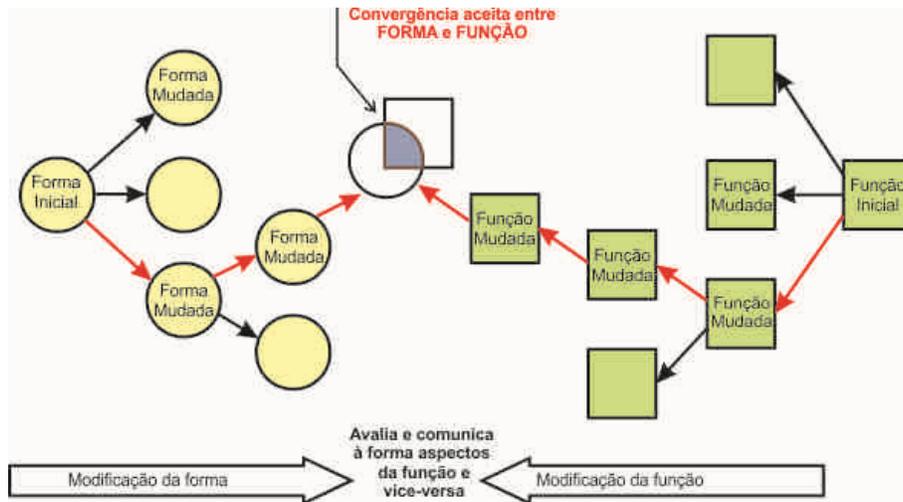
Kalay (1999) propõe o paradigma do projeto baseado no desempenho. Segundo essa abordagem, a qualidade do projeto só pode ser alcançada por meio da definição de múltiplos critérios de desempenho, da avaliação de desempenho de modo multidisciplinar e com o desenvolvimento de uma metodologia de projeto baseada no desempenho.

Para isso, Kalay (1999) propõe que o projeto seja considerado como um processo interativo de exploração, em que propriedades de funções desejadas sejam definidas, formas sejam propostas e um processo de avaliação seja usado para determinar a vantagem da convergência da forma e função. Kalay (1999) chama essa condição – quando forma e função se reúnem para obter um desempenho aceitável em um determinado contexto – de “adequação funcional” (Figura 3.1).

Para Kalay (1999), essa descrição de projeto leva a um paradigma diferente dos presentes nos métodos tradicionais de projeto, chamado por ele de “projeto baseado no desempenho”. Segundo ele, o desempenho deve ser uma medida desejada de confluência de forma e função dentro de um contexto, o que ele também chama de “comportamento”. Porém, o termo desejável é algo impreciso e subjetivo. Para satisfazer a essa imprecisão e subjetividade, Kalay (1999) propõe o conceito de “funções satisfação”, que consiste em um mapa que expressa relações

específicas entre comportamentos de um sistema e a medida subjetiva desejável sob certas circunstâncias.

Figura 3.1 Diagrama que sintetiza a convergência entre forma e função num contexto de projeto



Fonte: Kalay (1999, p.401)

As funções satisfação semelhantes podem ser desenvolvidas para cada aspecto do edifício. Para agregação de diferentes desempenhos, é possível estabelecer sobreposições. Como, em geral, diferentes comportamentos apresentam diferentes pesos na medida de desempenho global, é importante atribuir peso a cada um deles. O resultado de desempenho é o somatório dos pesos. Como nem todas as necessidades funcionais de um edifício podem satisfazer a qualquer uma solução, em geral, fazem-se certas escolhas em detrimento de outras. Nesse caso, o grau de satisfação pode ser comprometido. Para evitar isso, Kalay (1999) sugere algumas medidas compensatórias de satisfação.

A proposta de projeto baseada no desempenho de Kalay (1999) aborda o desempenho relacionado com a satisfação. A abordagem de projeto baseada no desempenho, todavia, abarca diferentes questões. Seu apelo paradigmático reside na multiplicidade de significados associados ao desempenho no projeto e na arquitetura.

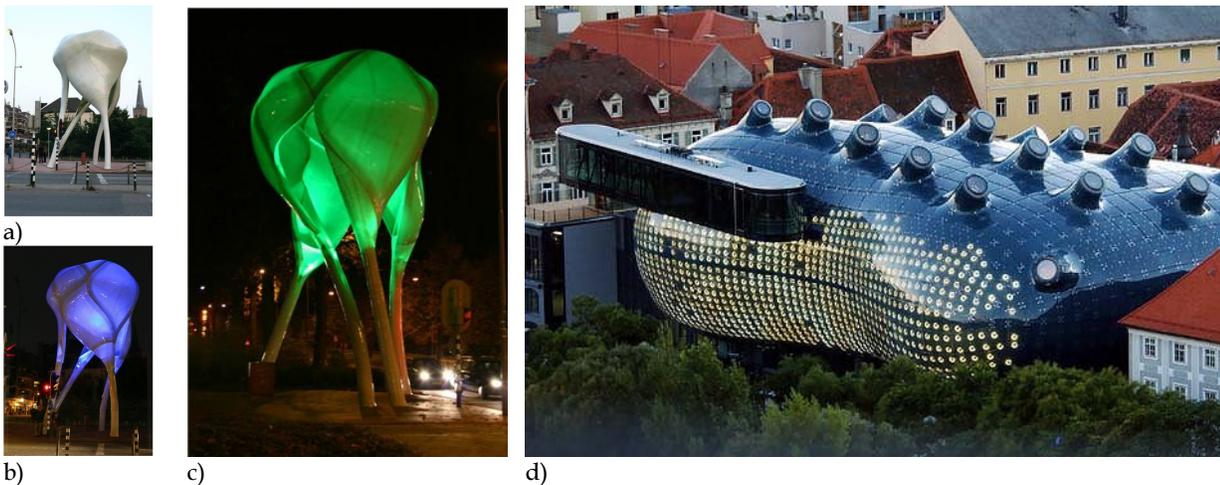
3.3 Arquitetura Performativa x Projeto Baseado no Desempenho

De maneira geral, as definições de desempenho podem ser agrupadas em duas principais categorias: a primeira caracteriza-se por teorias e significados da arquitetura performativa e suas definições abrangendo vários domínios, como financeiro, espacial, social, cultura, entre outros (KOLAREVIC, 2005); a segunda associa-se mais ao processo de projeto baseado no desempenho (OXMAN, 2007).

3.3.1 Arquitetura performativa

Kolarevic (2005) apresenta diferentes pontos de vista sobre o conceito de “arquitetura performativa”. Um primeiro conceito associa a arquitetura performativa à “arte performativa”. Nesse conceito, o espaço urbano apresenta-se como o “palco” para a “encenação” da arquitetura (Figura 3.2).

Figura 3.2 A arquitetura performativa usa o espaço urbano como palco para encenação



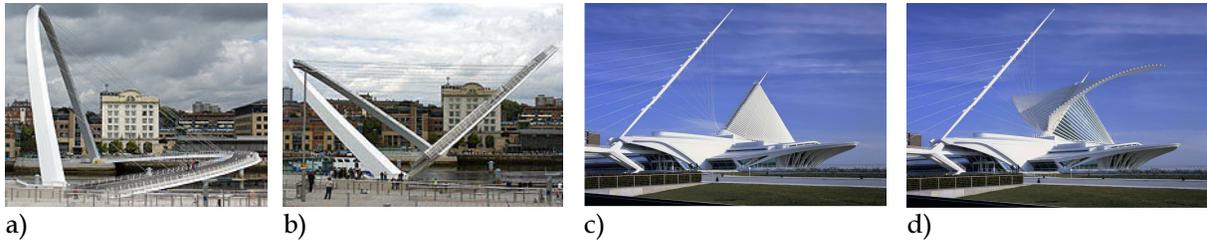
Nota: a, b, c) D-Tower é uma torre interativa de 12 metros de altura posicionada no centro da cidade de Doetinchem, Holanda (NOX arquitetura; Bollinger-Grohmann engenharia); d) Kunsthaus Graz é um museu construído para celebrar em 2003 a "Capital Européia da Cultura" na cidade de Graz, Áustria (Peter Cook + Colin Fournier arquitetos; Bollinger + Grohmann engenharia)

Fonte: a, b, c <<http://www.nox-art-architecture.com/>>; d. Kolarevic (2005, p. 141)

Uma segunda definição para o conceito de arquitetura performativa vincula-se à ideia de movimento. A “capacidade performativa” nesse tipo de projeto pode ser expressa pelo efeito

dinâmico da arquitetura. “Não é o sujeito que se move ao longo do edifício [...]”, mas o edifício, em si, move-se ou sua pele pode ter um efeito dinâmico, aparentando uma ideia de movimento (Figura 3.3). Cria-se a arquitetura do espetáculo, uma “arquitetura da performance” (KOLAREVIC, 2005, p. 208).

Figura 3.3 A arquitetura como movimento

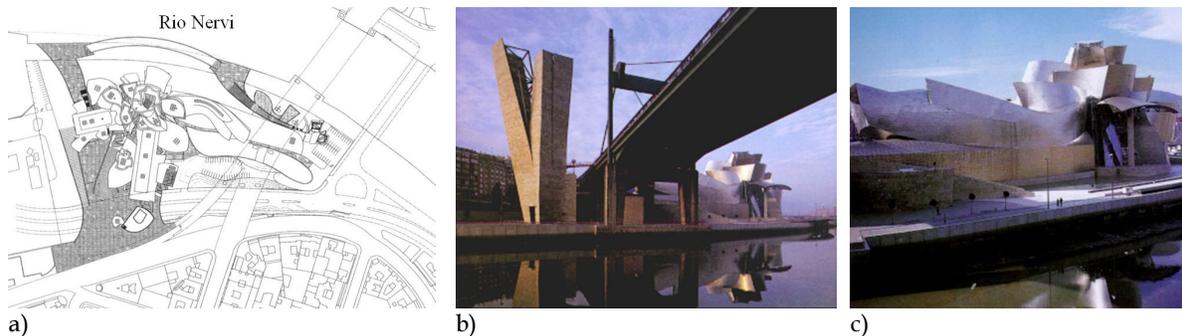


Nota: a, b) Gateshead Millennium Bridge é uma ponte de pedestre que se levanta para os barcos passarem, Newcastle, Inglaterra (Wilkinson Eyre arquitetura; Gifford & Printers engenharia); c, d) Milwaukee Art Museum possui asas que se movem protegendo o edifício do sol, Milwaukee, USA (Santiago Calatrava arquitetura; Graef engenharia)

Fonte: a, b <<http://www.galinsky.com>>; c, d <<http://www.calatrava.com>>

Uma terceira abordagem proposta por Kolarevic (2005) associa a arquitetura performativa à questão socioeconômica. A arquitetura aparece como um marco urbano que tem a função de energizar o contexto urbano no qual está incluso. O edifício torna-se um elemento altamente potencializador do espaço urbano. Essa abordagem é conhecida por “efeito Bilbao” em referência à transformação socioeconômica e cultural bem-sucedida, que houve na cidade de Bilbao, com a construção do Museu Guggenheim (KOLAREVIC, 2005) - Figura 3.4.

Figura 3.4 Arquitetura potencializador do espaço urbano



Nota: Imagens do Museu Guggenheim de Bilbao: a) Implantação do Museu; b) Museu Guggenheim visto do Rio Nervión; c) vista da fachada principal do edifício (Frank Gehry Arquitetura)

Fonte: Slessor (2007)

3.3.2 Projeto baseado no desempenho

Uma das questões principais, quando se trabalha com o projeto digital, está em pensá-lo como um meio para a exploração de outros domínios, que podem, inclusive, estar atrelados ao domínio da forma. Entre esses domínios, que podem emergir com o projeto digital, Kolarevic (2005) sugere a emergência do projeto baseado no desempenho. Nesse domínio, os fatores de desempenho do edifício (por exemplo, o desempenho ambiental) tornam-se os princípios-guia de projeto, que podem contribuir decisivamente para a geração da forma. Nessa abordagem, o desempenho aparece como instrumento que contribui para a revisão da estrutura tradicional de concepção do ambiente construído, podendo resultar em processos inovadores e criativos (OXMAN, 2007).

A busca por um melhor desempenho de projeto, todavia, deve ser considerado como um atributo de qualquer bom projeto, seja digital, seja não digital (LEATHERBARROW, 2005). Para Herzog (2005,) a forma arquitetônica deve ser pensada tendo como enfoque o predicado do desempenho. É o que ele chama de desempenho da forma (*performance form*).

Do ponto de vista do processo de projeto digital, o projeto baseado no desempenho pode implicar a reformulação das estruturas internas, com integração de mecanismos de simulação e geração, além de uma crescente integração de arquitetos com engenheiros, que precisam redefinir suas posturas projetuais para ações mais colaborativas, que ocorram em estágios ainda preliminares do processo de projeto (EASTMAN, 2009).

A ênfase no desenvolvimento de projeto baseado no desempenho desloca-se de uma questão de conceber um conjunto de soluções práticas para uma grande quantidade de problemas, para uma ênfase em estratégias de desempenho de projeto que estejam apoiadas em questões mais amplas e gerais. No contexto de um projeto digital, amplamente integrado, questões qualitativas e quantitativas de desempenho devem ser colocadas como princípios tecnológicos que orientarão novas abordagens de projeto (KOLAREVIC, 2005).

Kolarevic (2005) mostra que um dos grandes desafios do projeto baseado no desempenho é conciliar os diferentes aspectos de desempenho, em um projeto particular, e agregar diferentes interesses conflitantes de metas de desempenho, de uma maneira que seja

criativo e efetivo. Estabelecer essa dosagem torna-se um ponto fundamental no início do processo de projeto efetivamente baseado em desempenho.

3.4 Modelos de Projeto Digital Baseados no Desempenho

A abordagem do projeto digital baseado no desempenho envolve duas principais classes de projeto digital propostas por Oxman (2006). A primeira vincula-se à simulação baseada no desempenho (OXMAN, 2007). Nesse modelo de projeto empregam-se técnicas de simulação predominantemente analíticas em vez de generativas. Na segunda, as atuais ferramentas de avaliação transformam-se em instrumentos de “avaliação e síntese”, utilizando-se de técnicas de otimização e geração automatizadas (MALKAWI, 2005).

A compreensão dessas duas classes de modelos de projeto digitais fornece pistas valiosas para entender e distinguir os projetos digitais baseados no desempenho. A seguir, discutem-se mais detalhadamente algumas das principais características dessas duas classes denominadas neste trabalho Modelos de CAD para Avaliação e Modelos Performativos.

3.4.1 Modelo de CAD para Avaliação

Nas últimas décadas, desenvolveram-se muitos programas computacionais para avaliação das soluções arquitetônicas. Alguns desses baseavam-se em modelos físicos em escalas reduzidas e outros em modelos digitais. Em ambos, um esforço significativo era necessário na preparação de um banco de dados utilizados em uma única avaliação (EASTMAN *et al.*, 2008). Esse processo era muito caro e envolvia análises específicas com detalhadas definições.

Nos anos recentes, diversos métodos de projeto têm empregado técnicas como modelagem paramétrica e utilizado o recurso da interoperabilidade como meio para auxiliar na realização de avaliações automatizadas das soluções de projeto. Esses, em geral, relacionam-se com o *Building Information Modeling* (BIM). Muitos desses métodos, que atuam no controle da informação da construção para avaliação das soluções, utilizam mecanismos computacionais para a exploração de processos de avaliação da síntese arquitetônica, para posterior modificação

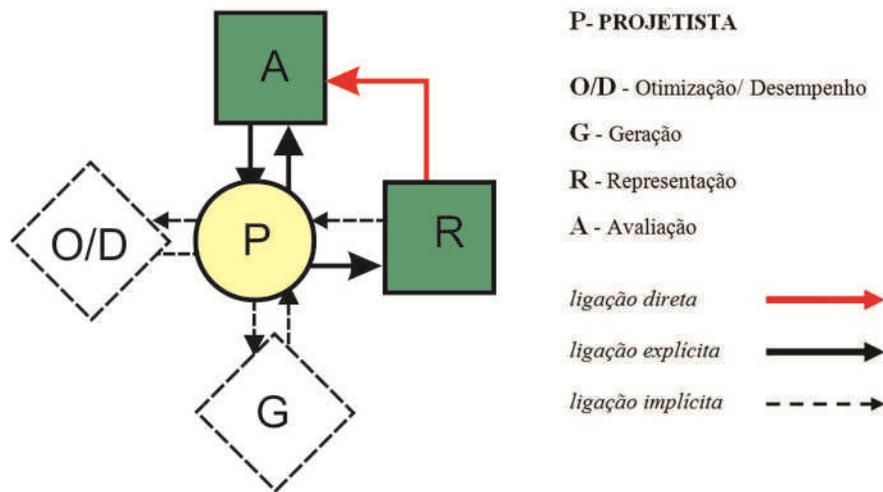
(OXMAN, 2007). Nesse ponto de vista, o projeto baseado no desempenho não resulta em transformações significativas nos processos de projetos tradicionais. Estão apoiados em uma abordagem homocêntrica (OXMAN, 2007).

Os métodos que utilizam esse modelo enquadram-se na subclasse do Modelo CAD, denominada neste trabalho de Modelo de CAD para Avaliação. Métodos baseados nessa classe fazem uso de ferramentas que avaliam, de modo automatizado, as soluções arquitetônicas, por meio da representação digital do modelo do edifício. Essas ferramentas permitem realizar avaliações das soluções de projeto por diversos pontos de vista, levantando questões de projeto, que até então eram pouco exploradas em estágios preliminares do processo de projeto; repercutem na necessidade da colaboração precoce entre projetistas, com o intuito de resolver conflitos de projeto que só eram visíveis em etapas mais avançadas do processo de projeto (EASTMAN *et al.*, 2008). A consequência é que o processo de projeto digital torna-se colaborativo já durante a concepção da forma (EASTMAN *et al.*, 2008).

No Modelo de CAD para Avaliação, a geração da forma permanece sendo realizada de maneira implícita, concebida na mente dos projetistas. Já a representação e a avaliação, ocorrem baseadas no meio digital. São concebidas mediante descrições explícitas. Na representação, o projetista interage com um esboço, um desenho ou um modelo digital, que requer ser desenvolvido no computador, por isso, precisa de formalização. O projetista interage com a avaliação por meio da definição de regras de avaliação. Entre a representação e a avaliação, existe uma ligação explícita (OXMAN, 2006; 2007). Para qualquer mudança na representação digital, novas avaliações poderão ser feitas automaticamente, em função de um banco de dados que contém informações compartilhadas (Figura 3.5).

O Modelo de CAD para Avaliação associa-se ao uso de métodos e técnicas que ajudam na avaliação (“*appraisal aids*”). Muitos dos métodos baseados nesse modelo utilizam ferramentas que tem como objetivo prever o desempenho do edifício em áreas como fluxo de calor, iluminação, estrutura, etc. Essas ferramentas visam identificar problemas específicos de projeto por meio de diferentes algoritmos de simulação (MALKAWI, 2005).

Figura 3.5 Representação simbólica do Modelo CAD para Avaliação



Fonte: Adaptado de Oxman (2006, p.248)

As primeiras ferramentas de avaliação automática tinham como limitação o fato de serem utilizadas na avaliação de apenas um desempenho. Para superar essa limitação, criaram-se mecanismos de simulação baseados em integração de algoritmos (EASTMAN *et al.*, 2008). Com o desenvolvimento da modelagem paramétrica, baseada em um modelo que suportava a modularidade e a herança, a simulação passa a ser uma atividade mais flexível e expansível. Essa mudança, de acordo com Malkawi (2005) possibilitou: condensar simulações distribuídas e compartilhadas; desenvolvimento de uma estrutura capaz de realizar análises integradas baseada em uma representação semântica, que incluía uma estrutura integrada de dados e objetos.

Malkawi (2005) mostra que, com a integração de dados guiados pelo usuário, é possível incorporar mecanismos de múltiplas simulações dentro de um sistema que possibilita interoperabilidade entre várias ferramentas por meio de um banco de dados compartilhado de informações do objeto.

Com o crescimento no uso de modelos de simulação baseados no desempenho, diversos métodos e técnicas passam a ser pesquisados e incorporados no desenvolvimento do projeto arquitetônico (EASTMAN, 2009). Esses métodos e técnicas relacionam-se com ambientes de suporte à decisão (sistemas de bases de conhecimento e métodos complexos de resolução de problema, por exemplo); otimização de modelos (técnicas em Inteligência Artificial); interfaces amigáveis combinadas com técnicas de visualização (MALKAWI, 2005).

Além dessas pesquisas, novos esforços nos campos da otimização e ambientes de suporte à decisão estão beneficiando-se do rápido desenvolvimento em áreas como métodos numéricos, estratégias de solução e do desenvolvimento de novos algoritmos. Muitos desses trabalhos, de acordo com Malkawi (2005), consideram o processo de projeto como um processo de metas orientadas ao objeto, em que as metas se definem por valores de desempenho desejados.

Tessmann (2008) mostra que pesquisas na área de otimização do projeto, por meio de simulação de desempenho, têm testado a eficiência do uso de algoritmos específicos. Para isso, vários métodos têm sido desenvolvidos recentemente.¹⁰ Além dessas, outras estratégias procuram combinar duas ou mais técnicas visando resolver problemas associados a questões particulares de projeto (SHEA, 2004).

Apesar dos grandes avanços nas áreas de simulação e otimização, o que se observa é que se utiliza pouco o potencial de técnicas e ferramentas dessas áreas para a síntese do processo de projeto arquitetônico e de engenharia (KOLAREVIC, 2003; 2005; LUEBKEMAN, 2003; KALAY, 2004; MALKAWI, 2005; OXMAN, 2006, 2007, 2008b, 2009b). Por outro lado, observa-se nos anos recentes um grande potencial para o uso da otimização do projeto visando melhorar o desempenho do edifício por meio de uma redefinição do processo de geração da forma arquitetônica, em que a simulação seja usada como propulsora do processo de síntese (SHEA, 2004; KOLAREVIC, 2005; MALKAWI, 2005; OXMAN, 2006, 2007, 2008b, 2009b; SASAKI, 2008). Para isso, é necessária a reformulação das estruturas dos processos de projeto de modo a mudar o foco das ferramentas de simulação baseados em análises para a incorporação de mecanismos de simulação que suportem a transformação ou geração da forma baseada no desempenho.

A incorporação de métodos, técnicas e ferramentas a novos processos de projeto tem um grande potencial de transformar a atividade de projeto. Passa-se, então, de um processo em que as técnicas de análises e visualizações são usadas como instrumento de avaliação, e em que as intervenções humanas guiam as mudanças em busca de um melhor desempenho, para um processo automatizado ou parcialmente automatizado, em que a simulação pode diretamente influenciar na mudança da geometria e das propriedades do modelo arquitetônico. Esse contexto será discutido a seguir.

¹⁰ Como exemplo: técnicas estocásticas (*simulated annealing* e Algoritmos Genéticos); *Gradient-based* (usada em complexas simulações); e técnicas de livre derivação (usadas na resolução de pequenos problemas).

3.4.2 Modelo performativo

No entendimento de Oxman (2008b), o termo performativo representa a síntese de duas principais características do projeto digital: transformação ou geração de modelos geométricos e avaliação analítica de desempenho baseado em simulações de condições físicas.¹¹ Projetos Performativos são os projetos baseados em métodos (Performativos) que integram, no processo de projeto digital, simulações avaliativas a técnicas de modificação ou geração da forma (geometria e propriedade), de modo automatizado ou semiautomatizado. Dentro desse conceito, o desempenho em si torna-se o elemento determinante na criação ou modificação da forma arquitetônica (OXMAN, 2008b). Modelos Performativos, por sua vez, constituem-se na classe de projetos digitais que usam métodos performativos. Este, de acordo com Oxman (2009b), é uma subclasse do Modelo Baseado no Desempenho.

Como morfogênese, o Projeto Performativo fundamenta-se na capacidade de encontrar a forma, em vez de fazer a forma, visando chegar a soluções inesperadas e mesmo únicas de projeto (OXMAN, 2008b). O modo como os projetos podem incorporar questões estruturais e materiais à geometria, ainda nos estágios iniciais de concepção da forma, é uma questão que, segundo Oxman (2008b), atrela-se à maneira como os sistemas de projeto performativo estão definidos.

Para Oxman (2008b) esses sistemas de projeto performativos em arquitetura compreendem três principais componentes, que, por meio das suas integrações, definem o projeto:

- o modelo geométrico – esse modelo requer a capacidade de transformação e de geração de acordo com as respostas advindas das avaliações. Em geral, relacionam-se com modelos paramétricos;
- os processos avaliativos – esse pode ser integrado a modelos geométricos e a mecanismos de otimização, que realiza transformações ou gerações nesse modelo. Para isso, pode-se utilizar uma única força ou múltiplas, incluindo múltiplos desempenhos e fatores de otimização;

¹¹ Por exemplo, ganhos solares, eficiência energética, melhoria estrutural, etc.

- interatividade do projetista – o projetista funciona como o moderador do processo. Este deverá estabelecer as bases do algoritmo usado no processo de modificação ou geração da forma.

Métodos, técnicas e ferramentas computacionais vão definir o modo como esses três componentes estarão integrados, e serão empregados no processo de geração da forma. Nesse contexto, o perfil do material e sua relação com a forma e a estrutura poderão ser fatores decisivos na orientação dos projetos performativos.

A mudança conceitual do processo projeto, de bases formais para um baseado no material, apoia-se na ideia do estudo do comportamento dos materiais e de suas repostas ao ambiente, à escala e à organização de sua estrutura (OXIMAN, N. 2010). Hensel, Sunguroglu e Menges (2008) mostram que essa inversão pode contribuir substancialmente para o desempenho orientado ao projeto, definido por uma prática em que o material e a forma estejam intrinsecamente relacionados, constituindo numa prática performativa. Novas abordagens baseadas nas propriedades dos materiais e em sistemas emergentes, apoiados numa capacidade emergente de manufatura, poderão possibilitar aos arquitetos estabelecerem e integrarem múltiplos desempenhos na geração da forma (HENSEL; MENGES, WEINSTOCK, 2010).

Do ponto de vista teórico, Oxman (2007) mostra que o projeto performativo indica uma mudança do processo de projeto de uma simulação analítica para uma simulação para síntese e geração. Oxman (2007) mostra que esta mudança é muito significativa, pois ao invés de analisar o desempenho de um projeto e modificar, de acordo com os resultados, a simulação baseada no desempenho pode instruir mecanismos de otimização para modificar ou gerar diretamente a forma. Neste caso, o desempenho passa a ser um fator impulsionador da transformação e/ou geração da forma (OXMAN, 2008b). Respostas imediatas de desempenho da solução servem como meio de estimular a imaginação no sentido de derivar novas possibilidades formais, que se adaptem mais satisfatoriamente aos critérios de desempenho (SHEA, 2004).

No Projeto Performativo, transformação ou geração da forma condiciona-se pelos requisitos de desempenho. Estes são definidos pela NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) como as “condições que expressam qualitativamente os atributos que o edifício e seus sistemas devem possuir visando satisfazer as exigências do usuário”. Esses requisitos são expressos em forças que representam os dados para a simulação

do desempenho. As forças podem ser ambientais (cargas estruturais, acústica, circulação, condições do lugar, programa, etc.), físicas (forças dos ventos), etc. A forma resultante se dá em função dessas forças. Nesse processo, utilizam-se técnicas digitais de simulação e otimização na busca da solução do projeto (FASOULAKI, 2008).

Desde os primeiros métodos que procuravam empregar um modelo mais performativo, várias técnicas desenvolveram-se e se aperfeiçoaram, algumas delas baseadas, por exemplo, em avaliação de múltiplos critérios de desempenho, interatividade, transformabilidade, controle paramétrico. Vários exemplos cunhados por diferentes autores mostram uma transformação na prática de projeto.¹² Essas mudanças, espelhadas em novas especialidades, indicam profundas alterações nos conceitos e nos processos de projeto, expressa em novas condutas, novos conhecimentos e habilidades que profissionais de projetos devem ter no manuseio das técnicas (MALKAWI, 2005).

Um dos problemas básicos para a transformação de um processo de projeto convencional para um baseado no Modelo Performativo, segundo Oxman (2007), relaciona-se com a maneira como os projetos são concebidos e modelados. O processo de projeto baseado no Modelo CAD, por exemplo, em geral, emprega o conceito de projeto tipológico. Este opera sobre as bases de grupos tipológicos de relacionamentos, constituído por estruturas orientadas a objetos, representadas em uma natureza integrada de dados compostas por famílias, objetos e instâncias. A criação desse modelo de estrutura (baseada em objetos), se, por um lado, possibilita maior flexibilidade e expansibilidade, importantes para a atividade de avaliação (EASTMAN *et al.*, 2008), por outro, pode dificultar avanços em processos generativos baseados no desempenho. A resposta vem com o uso de tecnologias de projeto paramétrico que substituam a abordagem de projeto tipológico para uma de base topológica (OXMAN, 2007).

Oxman (2006, 2007, 2009b) apresenta duas subclasses de Modelos Performativos. Na primeira, a simulação baseada no desempenho é usada para modificar diretamente o projeto arquitetônico por meio de processos de otimização da forma. Na segunda, a simulação baseada no desempenho é o elemento propulsor na geração da forma arquitetônica. Essas subclasses,

¹² Kolarevic (2003); Kolarevic; Malkawi (2005); Sasaki (2005); Oxman (2006, 2007, 2008b, 2009b); Fasoulaki (2008); Hensel; Menges (2008); Meredith; Sakamoto; Ferré (2008); Iwamoto (2009); Oxman; Oxman (2010).

abordadas a seguir, denominam-se neste trabalho respectivamente Modelo Performativo Baseado na Otimização e Modelo Performativo Baseado na Geração.

3.4.2.1 Modelo Performativo Baseado na Otimização

O Modelo Performativo Baseado na Otimização caracteriza-se essencialmente por técnicas que não apenas avaliam, mas propõem mudanças na solução arquitetônica existente, por meio de alguns parâmetros de desempenho estipulados. Ele se constitui por um modelo de formação baseada no desempenho que utiliza técnicas automatizadas de otimização digital.

Esse modelo baseia-se no conceito de modificação (*modifying*), como ato de modificar ou condição de ser modificada (FARLEX, 2010). Isso significa mudar a forma ou o caráter da forma, *transformation* (FARLEX, 2010). Nesse modelo, simulações digitais de forças externas são aplicadas conduzindo o processo de formação da forma (OXMAN, 2006). Esse modelo baseia-se, ainda, em um processo de formação orientado por técnicas analíticas de otimização, que podem diretamente modificar a geometria do modelo (OXMAN, 2009b).

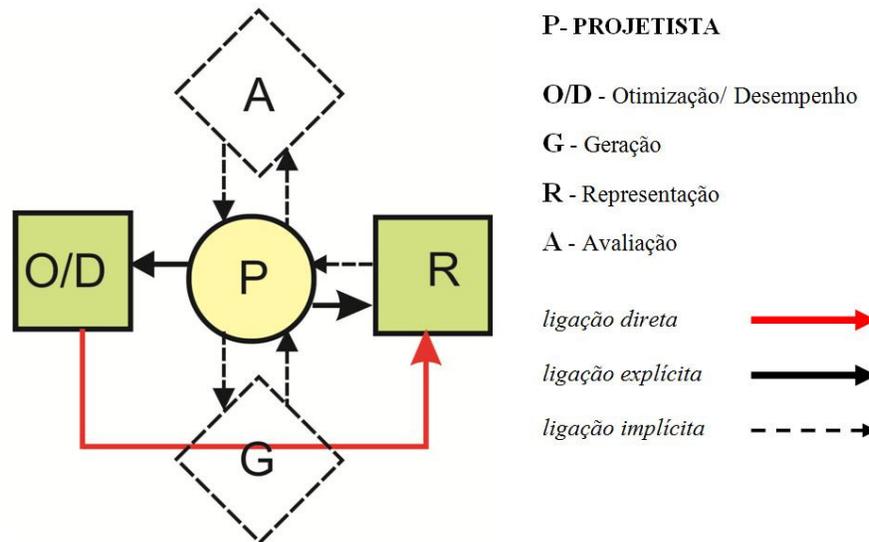
Essa subclasse de modelo performativo lida com um processo de otimização de solução previamente concebida. Nela o arquiteto ainda assume o papel de idealizador do partido arquitetônico, que, por sua vez, é alterado, transformado, adaptado para atender a uma condição de desempenho desejada. Esse modelo caracteriza-se por uma redefinição no processo de projeto com uma colaboração intensa entre diferentes projetistas (arquitetos, especialistas em conforto, engenheiros estruturais, etc.).

O Modelo Performativo Baseado na Otimização representa mudança na sequência de decisões convencionais do processo de projeto caracterizada pelas fases de análise, síntese e avaliação. Nesse ciclo, as soluções de projeto são criadas manualmente, porém são avaliadas e otimizadas por meio de mecanismos automatizados, cujo intuito é melhorar o desempenho da solução. Nesse modelo, o projetista interage com um mecanismo computacional que otimiza a solução e a representa (OXMAN, 2007).

A interação do projetista em dois dos quatro componentes do projeto digital ocorre de maneira explícita – Otimização, Desempenho e Representação (OXMAN, 2006). O projetista interage com um mecanismo computacional que otimiza a solução concebida manualmente e

em seguida a representa. Qualquer alteração nos critérios de desempenho implica alteração no processo digital de otimização da forma (Figura 3.6).

Figura 3.6 Representação simbólica do modelo performativo baseado na otimização



Fonte: Adaptado de Oxman (2006, p. 258)

3.4.2.2 Modelo Performativo Baseado na Geração

O Modelo Performativo Baseado na Geração caracteriza-se essencialmente por técnicas que não apenas avaliam a solução, mas geram outras soluções de projeto, a partir de parâmetros de desempenho estipulados. Constitui-se por um modelo de geração baseada no desempenho, que utiliza técnicas automatizadas de geração digital.

O Modelo Performativo Baseado na Geração baseia-se no conceito de geração (*generation*) como o “o ato ou processo de geração, originação, produção ou procriação” (FARLEX, 2010). Esse modelo pode empregar métodos generativos usando ou não um processo evolutivo. A geração é entendida como a “capacidade de invenção, produção, ou procriação” – *generative* (FARLEX, 2010). O processo evolutivo é compreendido como “um processo gradual de modificação, em que alguma coisa muda em algo diferente e usualmente mais complexo ou melhor” – *evolution* (FARLEX, 2010). Nesse modelo, processos generativos (*generating*) conduzem a geração ou evolução da geometria de modo a gerar, “trazer à existência, ou dar origem” (FARLEX, 2010), a forma arquitetônica.

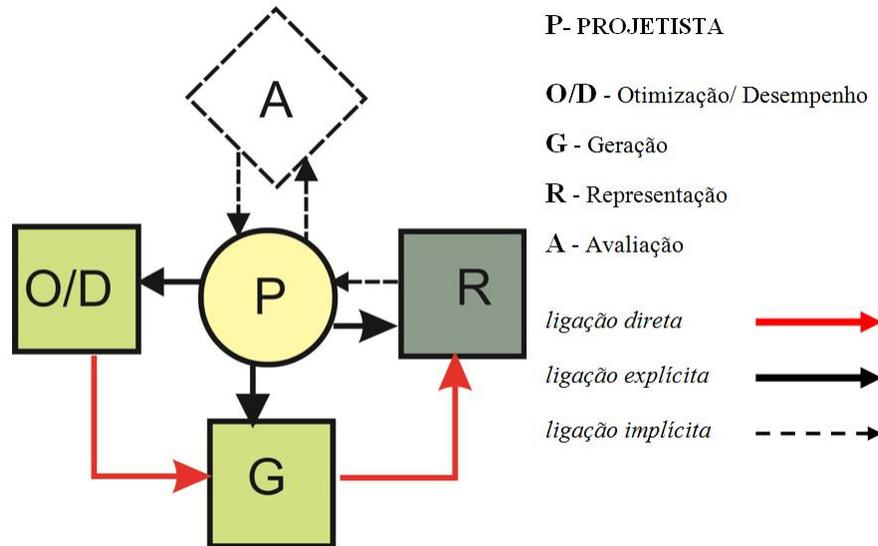
Nesse modelo, “dados de simulação de desempenho guiam os mecanismos de geração digital, aos quais vão gerar a forma” (OXMAN, 2007, p. 174).¹³ Esse modelo combina (em algum aspecto) o conceito de projeto generativo com desempenho de projeto. Esse inclui desempenho, técnicas de simulação e algoritmos de otimização (FASOULAKI, 2008). Projeto generativo caracteriza-se por um algoritmo ou processo baseado em regra para geração da forma. Nos sistemas de projeto generativo, a exploração da forma se baseia nas potenciais soluções de projeto.

Assim como no Modelo Performativo Baseado na Otimização, o modelo baseado na geração caracteriza-se por uma estrutura tecnológica constituída por mecanismos computacionais que utilizam processos formalizados para a modificação ou geração da forma. Enquanto o primeiro constitui-se, em geral, por mudanças no tipo, por meio de variações paramétricas, o segundo é um processo essencialmente topológico.

O Modelo Performativo Baseado na Geração representa significativas mudanças na sequência de decisões convencionais do processo de projeto. Os condicionantes de desempenho vão atuar diretamente na geração da forma. Nesse caso, a interação do projetista em três dos quatro componentes do projeto digital ocorre de maneira explícita – Otimização/Desempenho, Geração e Representação (Oxman, 2006), como no modelo baseado na otimização. A interação do projetista com a Otimização/Desempenho se dá por meio da definição do tipo de otimização a ser definida na proposta. O projetista também pode interagir diretamente com os mecanismos de geração da forma ou na representação da solução digital. Além do mais, existe uma ligação explícita entre os componentes: Otimização/Desempenho, Geração e Representação. Qualquer alteração nos critérios de desempenho implica alteração no processo digital de geração da forma e, por conseguinte, na sua representação digital (Figura 3.7).

¹³ No original: “data of performance simulations drives a digital generation mechanism which generates the form.”

Figura 3.7 Representação simbólica do Modelo Performativo Baseado na Geração



Fonte: Adaptado de Oxman (2006, p. 259)

3.5 Projeto Digital Baseado em Múltiplos Desempenhos

O desenvolvimento dos modelos de projeto digital baseados no desempenho representa uma classe ainda em desenvolvimento de paradigma de projeto digital. Apesar do grande potencial, o que se vê na prática é que esses modelos, em geral, limitam-se ao uso de poucos desempenhos, na transformação ou geração da forma. Paulatinamente, vem integrando o conceito de geração, avaliação e múltiplos critérios de desempenho.

Alguns experimentos já mostram o crescimento do uso de múltiplos desempenhos no projeto digital, não apenas na avaliação, mas também gerando a forma. Alfaris e Merello (2008), por exemplo, propõem um método digital de projeto baseado em múltiplos desempenhos constituído por sistemas modularizados integrados a sistemas acoplados. Nesse, o processo inicia-se com a decomposição do problema de projeto em módulos, e então, esses problemas são acoplados a uma rede de dados computacionais que procede como uma estrutura única de projeto. Esse método, por sua vez, permite a produção de soluções alternativas de projeto como base para uma posterior investigação, ao longo do desenvolvimento do projeto (ALFARIS; MERELLO, 2008). Essa experiência, todavia, é ainda embrionária.

Para elucidar as questões relacionadas com o uso de múltiplos desempenhos na atividade de projeto, na próxima seção aborda-se o conceito de Análises de Decisão de Multicritério, que é uma aplicação analítica de projeto baseado em múltiplos desempenhos. Discutem-se exemplos de uso desse tipo de análise em experiência de projeto. Em seguida, apresenta-se um caso recente de uso de múltiplos desempenhos em Projeto Performativo. Por fim, apresenta-se limitação no uso de métodos digitais baseados em múltiplos desempenhos.

3.5.1 Múltiplo desempenho e análise de decisão de multicritério

O projeto baseado em múltiplos desempenhos tem seu uso comumente relacionado com situações complexas de projeto. Nesse caso, reuniões de equipe visam definir os melhores critérios e as condições de desempenho para o projeto como um todo. Nesse tipo de projeto, em geral, empregam-se métodos analíticos de projeto apoiados em Análises de Decisão de Multicritério - *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA).

Por meio de ambientes baseados na MCDA, é possível a realização de avaliação de problemas complexos, baseada em decisões que apresentam um alto grau de incerteza. De acordo com Linkov *et al.* (2007) o uso de MCDA serve como um meio de avaliação e escolha de alternativas com base em múltiplos critérios utilizando-se análises sistemáticas como meio poderoso e científico de se chegar a decisões mais precisas de projeto.

A principal contribuição das MCDAs é ligar informações de desempenho com critérios de decisão de modo a possibilitar que projetistas possam visualizar e quantificar as compensações envolvidas no processo de tomada de decisão. Por meio do uso de matrizes de decisão de critérios e pontuação de desempenho, é possível chegar a uma abordagem sistemática de análises que integre níveis de riscos, incertezas e valoração de modo a obter avaliações e classificações de muitas opções (LINKOV *et al.*, 2007).

Quase todos os métodos que usam a MCDA partem de etapas semelhantes de organização e construção de matriz de decisão, porém cada um sintetiza informações de maneira diferente. Cada método exige diferentes tipos de informações de valor e utiliza variados algoritmos de otimização. Algumas técnicas geram e mapeiam o julgamento de valor em

estruturas e podem constituir-se por ferramentas que permitem análises de riscos e estimativas de custo (LINKOV *et al.*, 2007).

Alguns dos métodos MCDAs mais complexos, utilizam algoritmos de otimização. Esses empregam pontuações numéricas para comunicar o mérito de cada opção. Sistemas de pontuação são desenvolvidas por meio de desempenho das opções com relação a critérios individuais, e em seguida agrega em uma classificação de notas. Pontuações podem ser somadas ou podem ser usados mecanismos de ponderação para favorecer os critérios com maior peso. Entre as MCDAs mais sofisticadas Linkov *et al.* (2007) destacam: Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), Multi-Attribute Value Theory (MAVT), Analytical Hierarchy Process (AHP) e Outranking. Esses processos articulam informações sobre os desempenhos desejados com os critérios de decisão e as ponderações que são definidas pelos agentes de decisão de modo a auxiliar na tomada de decisões.

O uso de MCDA em arquitetura e engenharia civil tem-se tornado mais frequente nos últimos anos, principalmente em decorrência do aumento da complexidade das soluções. Como exemplos de métodos de MCDA usados nessa área, vale cita o SPEAR e o *optioneering*. Estes foram desenvolvidos pelo escritório de ARUP para resolução de diferentes problemas de projetos complexos. O SPEAR baseia-se numa abordagem mais manual; o *optioneering* baseia-se numa ferramenta digital denominada de DesignLink.

3.5.1.1 Diagrama SPEAR

O uso de Análises de Decisão de Multicritério em processo de projeto de edifício é, segundo Luebkehan (2003), uma filosofia que engloba o conceito de avaliação dos aspectos funcionais de todo o sistema que compõe uma construção, e não apenas os elementos segregados. A MCDA tem como base o diálogo entre clientes, engenheiros e arquitetos a respeito de quais os objetivos mais apropriados de desempenho.

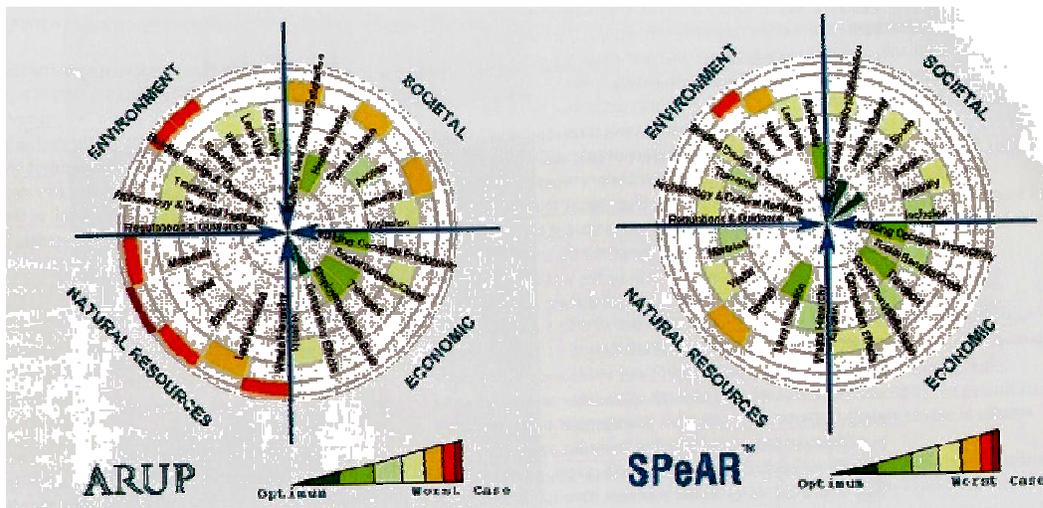
Luebkehan (2003, p. 284) afirma que a Análise de Decisão de Multicritério começa nos primeiros conceitos de projeto e leva em consideração “as experiências adquiridas ao longo dos anos, assim como, as experiências de campo e observações de laboratório sobre procedimentos não lineares de elementos e componentes”. A MCDA permite ao projetista ter o controle do

projeto e ser responsável pelos atos, em vez de simplesmente utilizar códigos de edificação como instrumento de aporte ao desenvolvimento da solução (LUEBKEMAN, 2003).

Uma das grandes dificuldades do desenvolvimento e uso de MCDA é que, com este, é necessário que os projetistas tenham a compreensão da totalidade do projeto, considerando toda a gama de opções e de combinações. Para isso, é necessária uma mudança significativa de paradigma para a maioria dos projetistas e clientes e uma transformação no modo de relacionar e buscar a colaboração.

Para resolver essa questão, Luebkehan (2003) apresenta um método aplicado no escritório do ARUP. Esse método utiliza uma ferramenta denominada diagrama SPEAR (Figura 3.8) para pensar a sustentabilidade como uma questão de MCDA, que envolve uma combinação de informações objetivas e subjetivas. Por meio dessa ferramenta, é possível estabelecer diversos níveis de desempenhos aceitáveis. A partir daí, a equipe de projetistas inicia a discussão sobre maneiras de se chegar a esses desempenhos. Por meio de consenso, chega-se à definição dos pesos dos principais critérios de desempenho na solução proposta.

Figura 3.8 Modelo do diagrama SPEAR



Fonte: Kolarevic (2003, p.286)

3.5.1.2 Optioneering e o designlink

O *optioneering*, termo que vem da junção das palavras opção + engenharia (*option* + *engineering*), é um métodos de MCDA usado na criação de opções para a tomada de decisões de

projeto. De acordo com Holzer (2009), utiliza-se na prática de projeto do Escritório ARUP (Melbourne). O *optioneering* é usado associado a uma ferramenta denominada de DesignLink. Esta permite que projetistas participem no processo de “*optioneering*” enquanto aplicam um conjunto de softwares proprietários (HOLZER, 2010).

O DesignLink é uma estrutura computacional de suporte ao projeto colaborativo e à tomada de decisão (HOLZER, 2009). Desenvolveu-se em um ambiente colaborativo entre instituição acadêmica e parceiros da indústria da construção e foi concebido para automatizar as ligações entre dados de projeto e de ferramentas de análise utilizados na prática da arquitetura e da engenharia. Ele não conduz a avaliação de desempenho do edifício em si, mas é uma interface que permite que usuários conectem dados de e para diferentes ferramentas computacionais. Em face de sua funcionalidade, o DesignLink oferece aos projetistas e consultores uma interface gráfica em que é possível visualizar a representação do projeto associada a informações dele (HOLZER, 2010).

O conceito central do DesignLink é o de representação e avaliação de múltiplas opções de projeto baseada em dados quantitativos de desempenho de projeto. A sua estrutura permite trabalhar com mecanismos de regra em que geometria e informações (propriedades dos materiais, custo, componentes, etc.) de um modelo de construção podem estar presentes de modo gráfico, durante a avaliação de desempenho, facilitando a escolha das melhores opções (HOLZER, 2009).

Para que seja possível estabelecer *optioneering*, o DesignLink mantém uma estrutura de dados entre diferentes funções e uma estrutura que funciona como uma ponte conectando informações entre essas. O DesignLink contém dados de geometria, requisitos de análises e resultados de análises de uma instância particular de um projeto. Quando um sistema usa automação e otimização, o DesignLink é capaz de coordenar e comparar instâncias de um grupo de dados. Quando o sistema tem uma estrutura capaz de realizar automação, o gerenciamento da informação da automação é armazenado no DesignLink, e não apenas a informação (HOLZER, 2009).

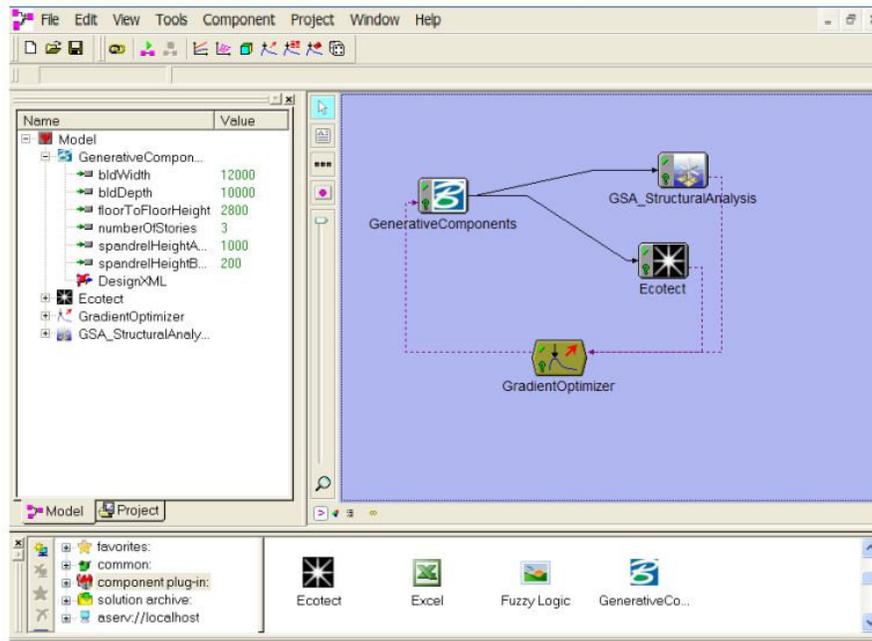
A estrutura do DesignLink configura-se para conectar informações de múltiplos softwares, com capacidade de acessar, interpretar e hospedar características geométricas e não geométricas de dados de diversas disciplinas. Essa estrutura suporta um superconjunto de todas

as informações relevantes, que são disponibilizadas para os usuários em cada etapa do processo de projeto. O modelo de informação é capaz de conter dados geométricos, requisitos de desempenho e resultados de análises para um determinado exemplo de projeto. Quando existe otimização, comparam-se e armazenam-se várias opções de dados (HOLZER, 2009).

A ligação entre a modelagem baseada em regras e a análise de engenharia de vários domínios é um aspecto fundamental para o uso do *optioneering*. Por meio da ferramenta PHX ModelCenter (PHOENIX, 2011), o DesignLink permite ligar dados de desempenho ambiental e estrutural à ferramenta de modelagem paramétrica (Figura 3.9). O PHX ModelCenter, segundo o Phoenix (2011), é uma ferramenta que visa melhorar o projeto ao permitir às equipes de projeto: navegarem por milhares de escolhas de projeto; encontrar soluções não intuitivas e inovadoras, que vão de encontro aos conhecimentos tradicionais; resolver problemas complexos em um ambiente multidisciplinar; e resolver problemas comuns com um alto grau de fidelidade por meio do uso de modelos de resposta, permitindo rápida aproximação à solução requerida de um dado projeto.

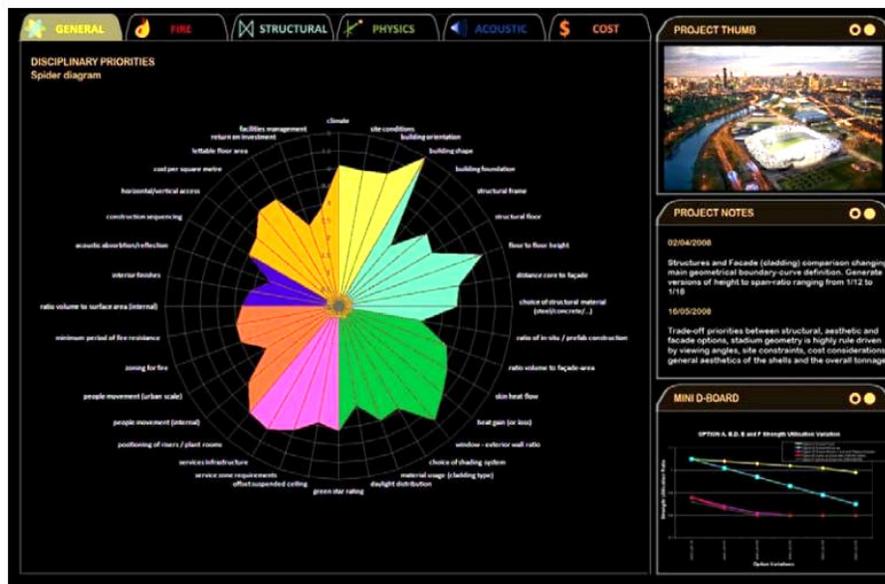
Enquanto o PHX ModelCenter funciona como uma ferramenta num segundo plano, o DesignLink utiliza uma interface visual para fornecer uma base comum para interpretação simultânea de diferentes indicadores de desempenho. Assim, facilita-se a personalização das informações que são exibidas de um modo intuitivo, permitindo que profissionais de distintas disciplinas estejam engajados no processo de tomada de decisão. O objetivo principal da interface visual do DesignLink, de acordo com Holzer (2009), é: permitir aos usuários selecionar as informações que devem ser exibidas; fornecer aos projetistas e consultores uma exibição simultânea de múltiplas representações de dados de projeto; registrar o histórico de evolução dos processos automatizados. A janela principal do DesignLink mostra informações numéricas e gráficas de dados de desempenho, imagens, notas de projeto, gráficos, etc. (Figura 3.10).

Figura 3.9 Visão da tela do Phoenix ModelCenter, com estrutura de análise multidisciplinar para o DesignLink



Fonte: Holzer (2009, p. 254)

Figura 3.10 Tela principal do DesignLink: apresentação do diagrama multidisciplinar e outras informações gerais de projeto



Fonte: Holzer (2009, p. 257)

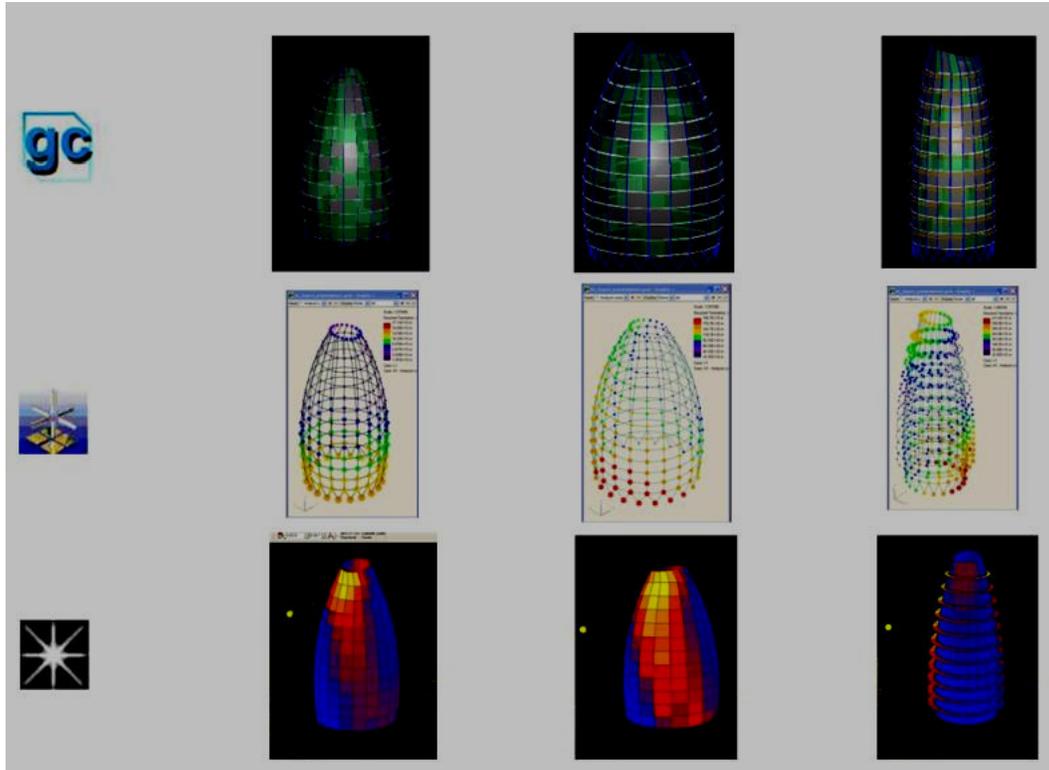
Figura 3.11 Tela principal do DesignLink: avaliação de soluções estruturais



Fonte: Holzer (2009, p. 258)

A interface do DesignLink é concebida como um ambiente que pode ajustar-se a condições específicas de acordo com as necessidades do projeto e com o tipo de integração que se deseja fazer a cada momento. Usuários podem selecionar uma visão geral do projeto (Figura 3.10), contendo informações relevantes para todos os envolvidos, ou podem escolher informações específicas de uma área (Figura 3.11). Os usuários também podem escolher um modo comparativo de até três diferentes disciplinas (Figura 3.12).

Figura 3.12 Quadro comparativo de variações paramétricas de um modelo gerado no GC e seus impactos na estrutura, avaliado no Strand, e no ganho solar, avaliado no Ecotect



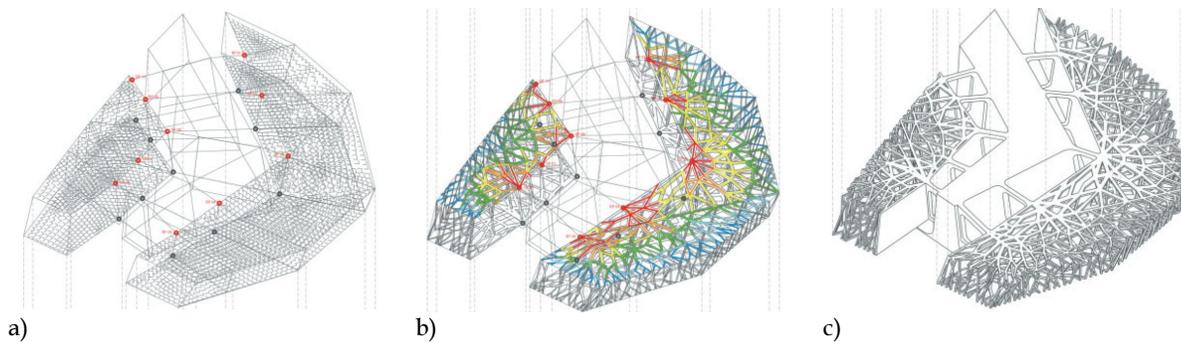
Fonte: Holzer (2009, p. 259)

3.5.2 Abordagem “morfoecológica” baseada em múltiplos desempenhos

Para situar o Modelo Performativo em uma abordagem baseada em múltiplos desempenhos, cabe citar um projeto desenvolvido por Hensel e Menges (2008), que usou um processo denominado de “desempenho inclusivo”. Esse se constitui numa abordagem “morfoecológica” de projeto performativo, usando múltiplos critérios de desempenho. Fundamenta-se em aspectos técnicos e tem como foco principal questões ambientais aplicadas ao processo de geração da forma, aliadas à criação de efeitos emergentes e inovadores de organização espacial. Nessa abordagem, buscou-se a eficácia de múltiplos parâmetros de desempenho de projeto em vez da otimização de um único parâmetro. Essa foi uma abordagem que levou em conta a lógica de como os materiais de construção são estruturados e como eles interagem com os estímulos e condicionantes ambientais.

Essa abordagem de projeto performativo integrou materialização, produção e construção como meio de se criar um projeto que explore o mais alto nível de potencial de síntese de uma solução arquitetônica - Figura 3.13 - (HENSEL; MENGES, 2008). Utilizou técnicas de computação digital e de manufatura como meios de avaliação dos efeitos de desempenho no projeto. Embora o uso dessas técnicas possa conduzir a estruturas inovadoras e novas qualidades espaciais, Hensel e Menges (2008) reconhecem que as tecnologias serviram apenas como uma extensão de um processo de projeto.

Figura 3.13 Exemplo de projeto desenvolvido sob uma abordagem morfoecológica



Nota: projeto do New Czech National Library em Praga (2007). Um procedimento analítico computacional indica a distribuição das tensões dentro do envelope do edifício (a), que é avaliado e mapeado como um campo vetorial que indica as forças principais (b). De acordo com essa informação estrutural e com outros parâmetros (ângulo de incidência da luz do sol, eixos de visão e características espaciais, por exemplo) uma rede de ramificações foi derivada em uma estrutura que envolve o edifício (c) (Michael Hensel e Achim Menges arquitetura; Bollinger-Grohmann engenharia)

Fonte: Hensel e Menges (2008, p. 105)

As técnicas computacionais e as tecnologias de fabricação digital foram desenvolvidas e empregadas por Hensel e Menges (2008) como um meio de manifestar as capacidades intrínsecas dos materiais e seus potenciais específicos de desempenho. Para isso, os procedimentos utilizados consistiram em experimentos extensivos e testes nos sistemas materiais, que guiaram a geração durante o processo de projeto. Esses sistemas, ao incorporarem as características materiais, comportamentos geométricos, restrições de manufatura e lógicas de montagem, dentro de um modelo computacional integral, possibilitaram estabelecer a compreensão da forma, material e estrutura e seus comportamentos não como elementos separados, mas como um complexo inter-relacionado (HENSEL; MENGES, 2008). Para isso, foram necessários:

- descrição geométrica do sistema material aliada à definição das possíveis formações e diferenciações; informação dos grupos de dados e características espaciais específicas,

organizações e restrições; uma estrutura computacional conteve parâmetros adicionais, restrições e características dos materiais, da fabricação, da lógica de montagem, comportamentos específicos de material e de geometria, restrições de forma impostas pelos maquinários, os procedimentos logísticos de montagem e as sequências de construção (HENSEL; MENGES, 2008);

- ciclos de avaliação recorrentes, que expunham o sistema a ferramentas de avaliação; as avaliações assumiram um papel crítico durante todo o processo morfogênico, não apenas em estabelecer e analisar critérios de adequação relacionados com as capacidades ambientais e estruturais, mas também em revelar os sistemas materiais e tendências de comportamentos geométricos; a relação entre restrições e capacidades em conjunto com realimentações entre estímulo e respostas foram elementos operativos no âmbito computacional (HENSEL; MENGES, 2008).

De acordo com Hensel e Menges (2008), uma abordagem “morfoecológica” usa múltiplos critérios de desempenho de maneira ampla e extensiva, em vez de simples teste de eficiência. Os modelos compostos utilizados nessa abordagem permitem a emergência de soluções de projeto imprevistas, o que resulta no potencial de criação de modelos não convencionais. Eficácia nesse tipo de projeto é a capacidade de gerar efeitos emergentes que exige criatividade, inteligência e instrumentalidade na concepção e elaboração de métodos analíticos integrais (HENSEL; MENGES, 2008).

Para tanto, Hensel e Menges (2008) mostram a importância no desenvolvimento de pesquisas em processos digitais de projeto sob uma visão integral e o desenvolvimento de novas habilidades necessárias para a implantação desses processos; vislumbrando novos potenciais de processos de geração da forma, que sejam emergentes em efeitos e eficazes.

3.5.3 Limitação dos métodos baseados em múltiplo desempenho

Entre as principais limitações do uso de métodos baseados em múltiplos desempenhos está no fato de a maioria deles apresentarem uma abordagem essencialmente analítica, em vez de conterem um caráter de transformação ou geração da forma. Ferramenta como o DesignLink, por exemplo, ao propiciar uma abordagem visual para análises de múltiplos critérios de

desempenho, aparece como potencializador de novas soluções formais. Porém, por não estar vinculado a processos generativos, ainda aparece como ferramenta analítica. Pesquisas recentes mostram a aplicação de métodos baseados em múltiplo desempenho na geração da forma. Alguns desses métodos serão abordados nos estudos de casos.

A tendência do futuro dos métodos de projetos baseados em múltiplos desempenhos está no uso de filtros que avaliem todos os aspectos de desempenho do projeto. Nesse ponto, chegar-se-á a um “novo domínio e uma nova era” do projeto digital composta por cinco dimensões de projeto: o ponto, a superfície, o volume, o tempo e a dimensão do desempenho. Nesse ponto, qualquer um poderá manipular as variáveis de desempenho e ver os efeitos dessas mudanças em tempo real (LUEBKEMAN, 2003, p. 285).

3.6 Projeto Performativo e Mudanças no Processo de Projeto de Arquitetura

As mudanças no processo de projeto com a introdução de Modelos CAD para Avaliação e principalmente Modelos Performativos são significativas e envolve a reformulação da estrutura do processo de projeto, com redefinição do papel do arquiteto e a intensificação da colaboração ainda nos primeiros estágios do processo de projeto. O emprego de Modelos Performativos representa um novo paradigma de projeto digital, com profundas alterações no processo de projeto. Exemplos de projetos recentes mostram que já existe considerável avanço nesse sentido. Discussões mais profundas serão realizadas nos Capítulos 5 e 6.

Por outro lado, vê-se a importância em: incorporar modelagem topológica nas ferramentas computacionais de autoria BIM, tradicionalmente tipológico; e melhorar nas ferramentas BIM o fluxo de informação digital, como meio de aproveitamento dessa informação nos estágios do processo de projeto. No próximo capítulo, abordar-se-ão mais detalhadamente o conceito BIM, suas principais tecnologias e impactos de seu uso de processo de projeto baseado no desempenho.

4 BIM E O PROCESSO DE PROJETO DIGITAL

Neste Capítulo, faz-se uma revisão da Modelagem de Informação da Construção ou *Building Information Modeling* (BIM) e a situa no contexto do processo de projeto arquitetônico digital. Para tanto, inicia-se com a caracterização do conceito BIM e apresenta-se sua evolução. Em seguida, definem-se e apresentam-se as duas principais tecnologias que o suportam: a modelagem paramétrica e a interoperabilidade. Para finalizar, posiciona-se o BIM no contexto do processo de projeto arquitetônico digital, associa-o ao conceito de projeto integrado e indica-se a necessidade de mudanças nas metodologias de projeto arquitetônico com o BIM, visando adaptar-se às novas práticas de projeto digital.

4.1 Considerações Gerais Sobre o BIM

Segundo Laiserin (2008), nessas últimas três décadas, realizaram-se muitas pesquisas visando desenvolver um processo de trabalho fundamentado no conceito BIM. Nesses anos instituições de pesquisa, universidades, empresas produtoras de softwares e órgãos regulatórios voltados para a indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) têm estudado o BIM sob diferentes aspectos e orientações do seu papel diante do processo de projeto, construção e operação do edifício. Diversas definições permeiam o universo do BIM e mostram que a sobreposição de limites entre cada um deles torna a singularidade do termo algo questionável. Dentre os termos mais utilizados, destacam-se os seguintes: *Building Product Models* (Charles Eastman); *BuildingSMART* (International Alliance for Interoperability);

Integrated Project Delivery (American Institute of Architects); *nD Modeling* (University of Salford – School of Built Environment); *Virtual Building* (Graphisoft); *Virtual Design and Construction & 4D Product Models* (Stanford University – Centre for Integrated Facility Engineering). Alguns desses associam o conceito BIM à ferramenta, outros a tecnologia ou processo. Todos concordam na necessidade de estabelecer um catalisador que visa reduzir a fragmentação da indústria da AECO, melhorar sua eficiência e diminuir custos da perda de informação ao longo do processo de projeto, construção e manutenção do edifício. Princípios como coordenação, colaboração e interoperabilidade são bases para o BIM.

Compreender o BIM como ferramenta significa associá-lo a um processo de instrumentação dos profissionais da AECO; ou seja, como aplicativo computacional para a produção e documentação do projeto do edifício. Apesar de ser uma visão muito limitada, é comum que alguns profissionais e vendedores de softwares associem o BIM ao uso de softwares de autoria BIM. Sob um enfoque mais tecnológico, o BIM pode ser considerado como uma tecnologia para o desenvolvimento e uso da informação do projeto do edifício, baseado num modelo de banco de dados, visando à documentação do projeto, simulação da construção e operação do edifício. Um enfoque mais coerente é considerar o BIM como um processo de projeto ou atividade humana, ou conjunto de sistemas, ou metodologia, fundamentado num gerenciamento das informações do edifício por meio de um modelo digital, visando à colaboração, coordenação, integração, simulação e otimização do projeto, construção e operação do edifício, durante seu ciclo de vida.

O National Institute of Building Sciences (2007, p. 20) define o BIM como produto, processo e ferramenta de gerenciamento. Como produto, o BIM é uma representação digital inteligente de dados, usada para criar e armazenar informações do modelo do edifício. Como processo, abrange diferentes disciplinas de projeto e estabelece processos automatizados de troca de dados, com informações abertas e seguras. Como ferramenta, é um instrumento de gestão das informações, fluxos de trabalho e procedimentos usados pelas equipes, ao longo do ciclo de vida do edifício.

Conforme Succar (2009), o BIM é um conjunto inter-relacionado de processos, tecnologias e políticas de gerenciamento do fluxo da informação digital na AECO. Como processos, o BIM envolve o projeto, a construção, a fabricação, o uso e a manutenção do edifício. Como tecnologia, relaciona-se com o desenvolvimento e suporte de sistemas e aplicativos de comunicação,

servidores de modelo, tecnologias de banco de dados, etc. Como política, engloba as melhores práticas, focadas nas diretrizes, regulamentações, padronizações, pesquisas, etc.

O BIM implica mudanças no processo de projeto, construção e acompanhamento do ciclo de vida do edifício, com novos processos de projeto, baseados na coordenação e na interoperabilidade, no compartilhamento e no reúso das informações. No campo do projeto, implica: redistribuir os esforços da atividade dos projetistas, com maior ênfase na etapa de concepção do produto; mudança na estrutura da ação projetual com redefinição das estratégias de investigação, das técnicas e dos procedimentos de avaliação. Para isso, é necessário que o modelo de edifício seja virtual, holístico e acessível por todos.

Uma das condições para a consolidação de um modelo virtual holístico do edifício é que ocorram mudanças no modo como as informações são tratadas ao longo do ciclo do projeto, da construção e do acompanhamento da vida útil do edifício, de modo que possam ser reconhecidas e agrupadas (BELL; BJØRKHAUG, 2006). Para que isso ocorra, é necessário que se saiba como trocar e dividir informações, que informações devem ser trocadas e divididas, quais e quando. A partir daí, é possível pensar em compartilhar e coordenar, num “modelo virtual”, as informações do edifício a serem utilizadas por diferentes campos de atividades, estágios do processo de projeto e com diferentes olhares.

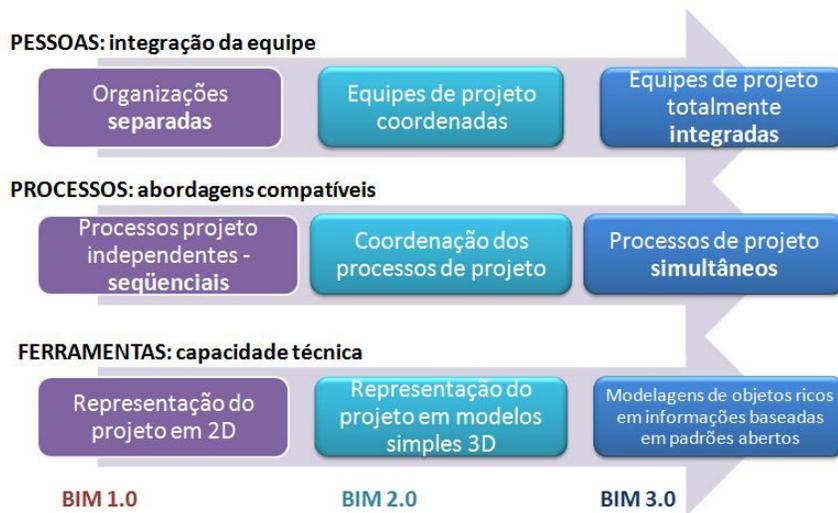
4.2 O Desenvolvimento do BIM na AECO

As tecnologias disponíveis e o modo como são empregadas nas diferentes fases do projeto, construção e operação mostram que ainda é necessária uma grande evolução para que se possa usufruir todas as vantagens do BIM.

Para compreender melhor o estágio de consolidação do BIM na AECO, importa que se identifiquem algumas mudanças que vêm ocorrendo nos processos, tecnologias e nas estruturas das equipes de trabalho. Segundo Tobin (2008), essas mudanças ocorrem em três estágios, que ele chama eras: BIM 1.0; 2.0; e 3.0. Além desses três estágios, Succar (2009) acrescenta um estágio chamado de pré-BIM e o *Integrated Project Delivery*, como o que se deseja alcançar com o BIM. De acordo com Jernigan (2007), o BIM evolui do *little bim* para o *BIG BIM*. Já Russel e Elger (2008),

afirmam que passa do *BIM corrente* para o *Next BIM*. Em cada estágio, pode-se observar um progressivo aumento nos níveis de colaboração (integração de equipes), de coesão entre os processos e na melhoria da capacidade técnica computacional (Figura 4.1).

Figura 4.1 Níveis de maturidade BIM



Fonte: Autoria própria

O estágio BIM 1.0 representa a emergência dos aplicativos baseados em objetos (OOCAD), que substituem os aplicativos baseados em entidades (TOBIN, 2008). A ênfase está na modelagem paramétrica. Geralmente envolve uma única disciplina de projeto no desenvolvimento do modelo 3D. O processo é iterativo, sequencial com comunicação assíncrona. As entregas esperadas são: modelos geométricos tridimensionais; documentação e visualização automáticas; extração de quantitativos a partir do modelo. As principais características são: capacidade de coordenação de documentos; adição de informações aos objetos; rápida produção de documentos – geram-se documentos em tempo real; atividades de projeto ainda isoladas. Vantagens: melhor coordenação de documentos; maior produtividade; melhor qualidade do projeto; maior controle da informação; novos serviços oferecidos aos clientes (BIRX, 2005).

As práticas colaborativas são semelhantes às da era pré-BIM, pois não há trocas significativas entre diferentes disciplinas com base no modelo, e os fluxos de informação são unidirecionais, com uma comunicação assíncrona e desarticulada. Nesse estágio de adoção observam-se baixas mudanças em políticas, médias mudanças em processo e alta mudança em

tecnologia (SUCCAR, 2009). Pode ser daí a impressão inicial de que BIM trata apenas de tecnologia.

O BIM 2.0 é um estágio de convergências e de popularização do uso de ambientes de interação, com programas integrados de análise, de modelos 4D (tempo) e 5D (custo) (TOBIN, 2008). Tem ênfase no compartilhamento multidisciplinar do modelo entre uma ou duas fases do processo de projeto envolvendo até duas disciplinas ou dois agentes diferentes. O processo é interativo, ainda assíncrono, mas com melhoria da interoperabilidade entre os agentes envolvidos. As entregas esperadas são: modelos 4D (tempo) e 5D (custo), compatibilização automatizada por meio de *clash detection*, melhoria da qualidade da informação do modelo e das informações extraídas do modelo. Observam-se nesse estágio mudanças médias em políticas e processo e baixa mudança em tecnologia (SUCCAR, 2009).

Nesse estágio, o BIM permite centralizar o controle e o fluxo das informações que devem ser utilizadas no processo projeto, planejamento e produção do edifício. São visíveis as primeiras tentativas de estabelecer maior comunicação entre as diferentes disciplinas. O fluxo de informações ocorre dentro ou entre duas fases do ciclo de vida do edifício: entre diferentes projetos; entre projeto e construção; e entre projeto e operação. A interoperabilidade e a colaboração tornam-se essenciais ao projeto, com disciplinas apoiadas em novas tecnologias.

O BIM 2.0 representa o início de mudanças significativas para o processo de projeto de arquitetura. As mudanças ocorrem no gerenciamento das informações, na necessidade de uma prática integrada e no uso de ferramentas que permitem a revisão, simulação e avaliação de soluções de projeto, de modo semiautomatizado. Torna-se essencial o uso de formatos de arquivos de troca.

O estágio BIM 3.0 ou *BIG BIM* (JERNIGAN, 2007) representa a prática de trabalho em equipes multidisciplinares, com modelos integrados e fluxos de informação contínua, sem perdas ou sobreposições. A ênfase está na criação compartilhada e colaborativa do modelo em todas as fases de projeto, construção e operação. O processo é simultâneo e recursivo, envolvendo análises complexas, já nos estágios iniciais do processo de projeto. Múltiplas disciplinas utilizam e modificam o modelo (ou modelos) por meio de um processo integrado e compartilhado fazendo uso de repositório e sistemas de banco de dados. Nesse estágio observam-se mudanças drásticas em políticas, processos e tecnologias (SUCCAR, 2009).

No BIM 3.0, os modelos de edifício são criados com uma semântica rica, para compartilhar e manter as informações ao longo do ciclo de vida do edifício; e um modelo interdisciplinar, permite análises diversificadas a partir dos estágios iniciais do processo de projeto. Essa geração BIM exige dos arquitetos a capacidade de reunir, filtrar e processar uma grande quantidade de informações utilizadas na geração da forma arquitetônica. O processo de projeto torna-se colaborativo e integrado, desde os primeiros estágios.

Os estágios descritos acima representam momentos evolutivos do BIM. O ponto final, segundo Succar (2009), é o *Integrated Project Delivery* (IPD), que é o momento de fusão dos domínios tecnológicos, dos processos e das políticas, integrando pessoas, sistemas, práticas em um processo colaborativo. O IPD visa à otimização dos resultados do projeto, ao aumento do valor agregado, à redução de perdas e eficiência nas fases de projeto, fabricação, construção e operação do edifício.

4.3 A Modelagem Paramétrica

O BIM, segundo Eastman *et al.* (2008), fundamenta-se em duas tecnologias: modelagem paramétrica e interoperabilidade. Nesta seção define-se e caracteriza-se a modelagem paramétrica.

O processo de projeto constitui-se de sequências de decisões que ocorrem em ciclos, com análises, sínteses e avaliações. Em diversos momentos da síntese, geram-se variações na geometria do modelo para testar. Esses testes permitem, dentro do espaço de soluções, verificar qual dos modelos melhor resolve o problema de projeto. O uso da modelagem paramétrica possibilita a realização de variações no modelo geométrico, que se torna um modelo paramétrico, baseada em ferramenta de CAD “inteligente”. Com isso, o processo de busca de soluções de projeto passa a ser mais rápido e flexível (BARRIOS, 2004).

O ponto de partida para o uso da modelagem paramétrica é que tenha como base modelo paramétrico, utilizando-se, para isso, CAD Orientado a Objeto OOCAD. O Modelo Paramétrico, segundo Barrios (2006), é uma representação computacional de um objeto construído com entidades, geralmente, geométricas (algumas não são geométricas), que têm

atributos que são fixos e outros que podem ser variáveis. Os atributos fixos são denominados como controlados e os atributos variáveis podem ser representados por parâmetros e regras, de modo a permitir que objetos sejam automaticamente ajustados de acordo com o controle do usuário e a mudança de contexto.

Com a utilização de ferramentas computacionais embebidas por objetos paramétricos, o projetista pode explorar diferentes opções de soluções de projeto, de modo rápido e seguro. Essas diversas opções podem ser criadas e reconstituídas sem apagar ou criar outro desenho.

4.3.1 Modelos, projetos e objetos paramétricos

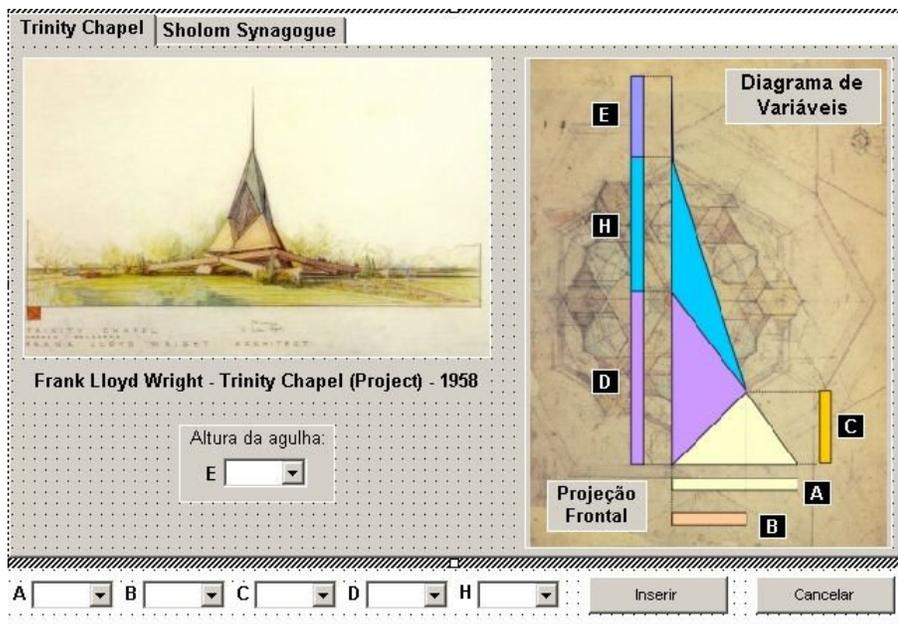
Os objetos paramétricos são usados na criação de projetos paramétricos. Os projetos paramétricos utilizam um ambiente em que as variações nas propriedades dos objetos (usados naqueles ambientes) podem ser feitas de maneira fácil. Substitui-se a singularidade de um objeto por uma multiplicidade de opções de variações daquele objeto, durante o processo de projeto. Em vez de projetar um modelo específico do elemento de construção, como a porta, a parede ou a janela, o projetista pode estabelecer uma família ou uma classe de objetos. Esses se definem por uma série de relações e regras usadas para controlar os parâmetros dos objetos, que poderão variar de acordo com o contexto de inserção (EASTMAN *et al.*, 2008).

Nos projetos paramétricos, os projetistas utilizam objetos com parâmetros conhecidos para definir a forma. Esses parâmetros podem envolver: distâncias, ângulos e regras (fixado a, paralelo a, distante de); regras definidas como requisito de um projeto, permitindo ao projetista estabelecer mudanças enquanto as regras checam e atualizam detalhes, de modo a manter os elementos de projeto válidos e garantir os usos se as definições não forem satisfeitas (EASTMAN *et al.*, 2008). Para isso, é fundamental que os objetos paramétricos: tenham especificado requisitos rigorosos de projeto; sejam capazes de erguer uma complexa estrutura geométrica; e sejam flexíveis o suficiente para estabelecerem variações (BARRIOS, 2006). Como ponto de partida, os projetistas precisam antecipar sobre que tipo de variações eles querem que os modelos suportem, o que contradiz a natureza imprevisível do projeto.

Para Barrios (2006), independentemente da qualidade da implementação e de sua sofisticação, os objetos paramétricos podem ser classificados em:

- Objetos para variações paramétricas – construídos numa natureza declarativa de parâmetros. Nesse tipo de objeto paramétrico, os projetistas podem criar modelos geométricos de qualquer natureza e seus atributos são parametrizados de acordo com variações desejáveis, criando, assim, esquemas de modelagens parametrizadas (Figura 4.2). Os projetistas podem visualizar quais atributos são parametrizados e como eles podem mudar os valores dos atributos. A geometria é controlada pela maneira como os parâmetros limitam as mudanças de valores dos componentes, enquanto sua topologia permanece constante. A principal vantagem desse tipo de objeto é a possibilidade de realizar mudanças na geometria, sem apagar ou redesenhar o objeto (Figura 4.3). As mudanças são feitas individualmente para cada parâmetro; com isso aumentam-se as possibilidades de composição de projeto (BARRIOS, 2006).

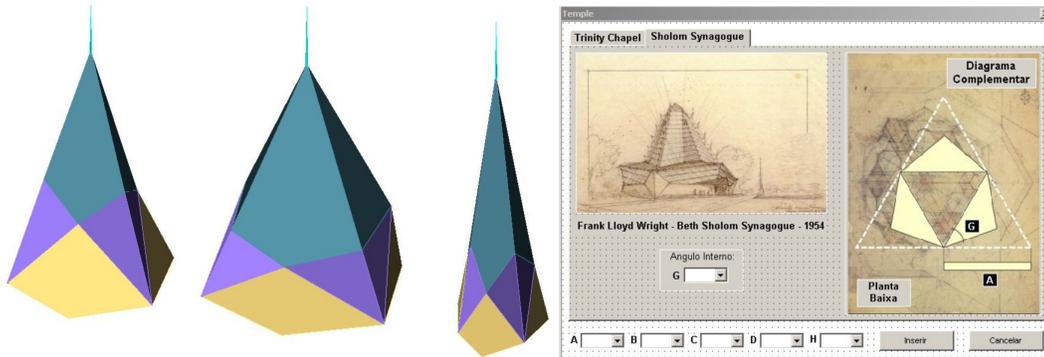
Figura 4.2 Atributos parametrizados em projeto de edifício



Nota: Por meio de certos parâmetros de projeto pode-se mudar a forma mantendo a mesma topologia do edifício

Fonte: Celani (2008), Notas de aula

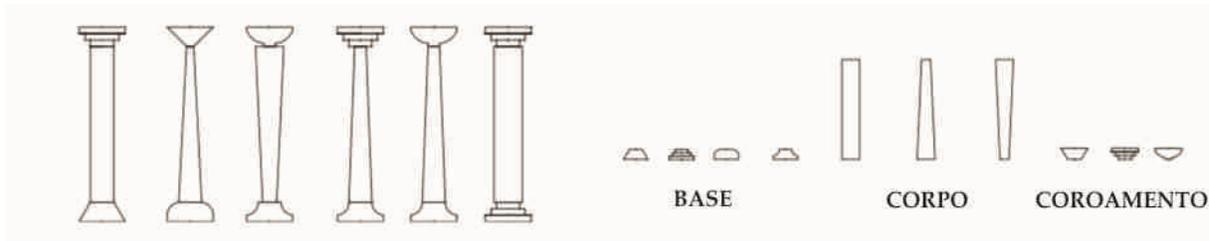
Figura 4.3 Alterações em alguns parâmetros resultam em mudanças nos padrões de proporção do edifício



Fonte: Celani (2008), Notas de aula

- Objetos para combinações paramétricas – compostos por uma série de formas geométricas organizadas de acordo com regras que criam estruturas mais complexas. Esse modelo de objeto traz consigo uma série de formas geométricas (vocabulários) que se combinam em função de regras para criar estruturas mais complexas – Figura 4.4 (BARRIOS, 2006).

Figura 4.4 Modelos para combinações paramétricas



a)

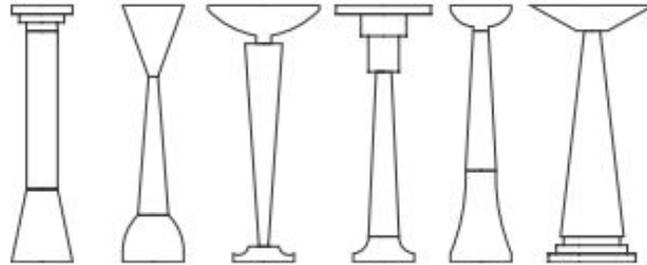
b)

Nota: a) Família de colunas projetada com base nesse modelo; b) Componentes primitivos de uma coluna: base, corpo e coroamento

Fonte: Barrios (2006, p. 314)

- Objetos paramétricos híbridos – embora seja menos usado que os outros dois, oferece a vantagem de ter as propriedades dos dois modelos anteriores, sendo mais robusto para a exploração durante a atividade de projeto (Figura 4.5). O problema desse sistema é que ele é complexo e requer uma estrutura de dados capaz de atender a um vocabulário de projeto.

Figura 4.5 Modelo paramétrico híbrido



Nota: Nesse caso, os componentes da coluna são parametrizados e combinados

Fonte: Barrios (2006, p.314)

4.3.2 Sistemas de base de conhecimento e modelagem paramétrica

A possibilidade de incorporação - nos objetos paramétricos - de conhecimentos produzidos na indústria da AECO faz crescer a importância na discussão sobre dos domínios de conhecimento. Para Lee, Sacks e Eastman (2006), o domínio do conhecimento na AECO pode ser feito baseado: nas propriedades dos materiais e de fabricação, índices de segurança, disponibilidade para produção pela máquina, boas práticas de projeto, padrões estéticos, regras de geração, sequência de construção, propriedades não geométricas do objeto, etc. A maioria desses princípios pode ser expressa geometricamente e incluída no projeto do edifício. A incorporação nos objetos paramétricos de sistemas de base de conhecimentos melhora o diálogo entre projetista e as ferramentas computacionais (BARRIOS, 2006).

A introdução de sistemas de base de conhecimentos na modelagem paramétrica é um poderoso instrumento de suporte à atividade de projeto. Pode mostrar aos projetistas, em tempo real, eventuais problemas decorrentes das ações projetuais e permitir checagens automáticas de conflitos de projeto. Embora essa seja uma promissora área de desenvolvimento dos sistemas computacionais de auxílio ao projeto, com o suporte de ferramenta computacional baseado na inteligência artificial, as pesquisas nessa área ainda precisam avançar (BARRIOS, 2006; EASTMAN *et al.*, 2008).

Para agregar domínios de conhecimentos a um objeto, é necessário que os sistemas de modelagens paramétricas tenham o conhecimento sobre as características daquele objeto e que os sistemas tenham comportamentos (*behavior*) inteligentes que sejam próprios das aplicações do objeto (LEE; SACKS; EASTMAN, 2006). Entende-se comportamento como a capacidade de um objeto em responder a estímulos internos e externos, resultado, por exemplo, de mudanças no contexto. Entende-se por inteligência a capacidade de um sistema de modelagem paramétrica em responder a estímulos de acordo com habilidades específicas (LEE; SACKS; EASTMAN, 2006). Desse modo, sempre que conhecimentos expertos estiverem presentes em complexos sistemas de modelagens paramétricas, será possível criar e fornecer informações que sejam válidas e consistentes, auxiliando o projetista e permitindo maior coerência na modelagem da informação do edifício.

Todavia, Lee, Sacks e Eastman (2006) citam como obstáculos:

- a dificuldade em capturarem conhecimentos tácitos e interpretá-los em características geométricas e outras relações capazes de serem compreendidas por um sistema;
- o risco na propagação de erros, haja vista que processos de avaliação de projetos passam a ser cada vez mais automáticos, requerendo, para isso, um método preciso e cuidadoso de especificação de condicionantes de maneira ambígua;
- a redução do desempenho dos modelos computacionais, que pode ocorrer quando uma grande quantidade de parâmetros e limitações geométricas estiver incorporada ao modelo.

Segundo Lee, Sacks e Eastman (2006), à medida que modelos paramétricos permitirem aos projetistas adicionar objetos parametrizados, será importante criar métodos comuns para descrever intenções. Assim, será possível dividir e reutilizar objetos paramétricos, pelo menos nas comunidades e entre colaboradores. Para isso, os autores sugerem que problemas de ambiguidade, complexidade e incomunicabilidade possam ser reduzidos a diretrizes claras e a um processo de modelagem sequencial.

4.3.3 Capacidades de um modelo paramétrico

As famílias de objetos paramétricos são definidas, segundo Eastman *et al.* (2008), usando parâmetros que envolvem distâncias, ângulos, e regras, tais como conectado a, paralelo a, distante de. Muitas dessas famílias admitem o condicional *if-then*. Com o condicional *if-then*, é possível substituir uma família de objetos ou características de um projeto por outros, baseados em testes que resultam em algumas condições (EASTMAN *et al.*, 2008). Assim, é possível firmar vínculos entre diferentes objetos, estabelecendo unidades formais ou funcionais no emprego de grupos de objetos.

Entre as capacidades mais “interessantes” de um sistema de modelagem paramétrica, está a de detecção de conflitos de objetos que espacialmente interferem um no outro. A capacidade de detecção de conflitos é especialmente importante quando se trabalha com vários sistemas integrados em um único modelo (arquitetura, estrutura, instalações sanitárias, instalações elétricas, elevadores, etc.). De acordo com a Graphisoft (2007), o uso de ferramentas de detecção automática de conflitos pode trazer uma redução em cerca de 10% no custo da construção.

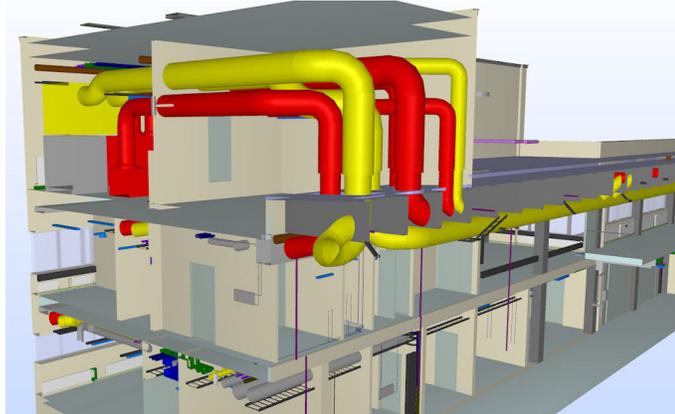
Segundo Eastman *et al.* (2008), existem dois principais tipos de interferências entre os objetos:

- Interferências rígidas, aquelas em que dois objetos se cortam (Figura 4.6);
- Interferências brandas, quando dois objetos estão muito próximos, dificultando juntar, agregar ou com espaço insuficiente para seu funcionamento/ manutenção (Figura 4.7).

Outra capacidade que depende da modelagem paramétrica está no “entendimento” do espaço, que é o vazio formado pela interseção dos objetos, componentes de construção (paredes, pisos, tetos, etc.), que o limitam. Os espaços definem as principais unidades funcionais dos edifícios e suas áreas, volumes, características da superfície e formas. Esta capacidade de “entendimento” de algumas unidades funcionais do espaço tem levado ao The National 3d-4D-BIM Program a focar estudos usando o BIM para validação espacial, pois segundo eles, problemas envolvendo validações espaciais são comuns em todo o tipo de projeto (GENERAL SERVICES ADMINISTRATION, 2007). Algumas experiências nesse sentido vêm sendo

desenvolvidas em diferentes categorias de projetos, como, em projetos de Cortes de Justiça (Eastman, 2009).

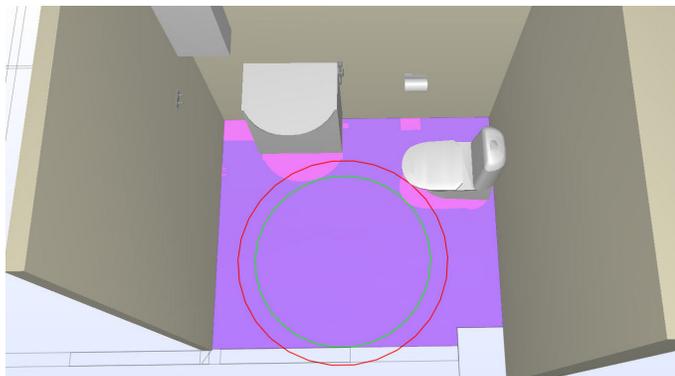
Figura 4.6 Interferência rígida entre objetos



Nota: O sistema detecta conflitos resultado do choque de dois objetos

Fonte: Solibri (2009)

Figura 4.7 Interferência branda entre objetos



Nota: O sistema detecta que o espaço de funcionamento do lavatório e da bacia é insuficiente para o cadeirante

Fonte: Solibri (2009)

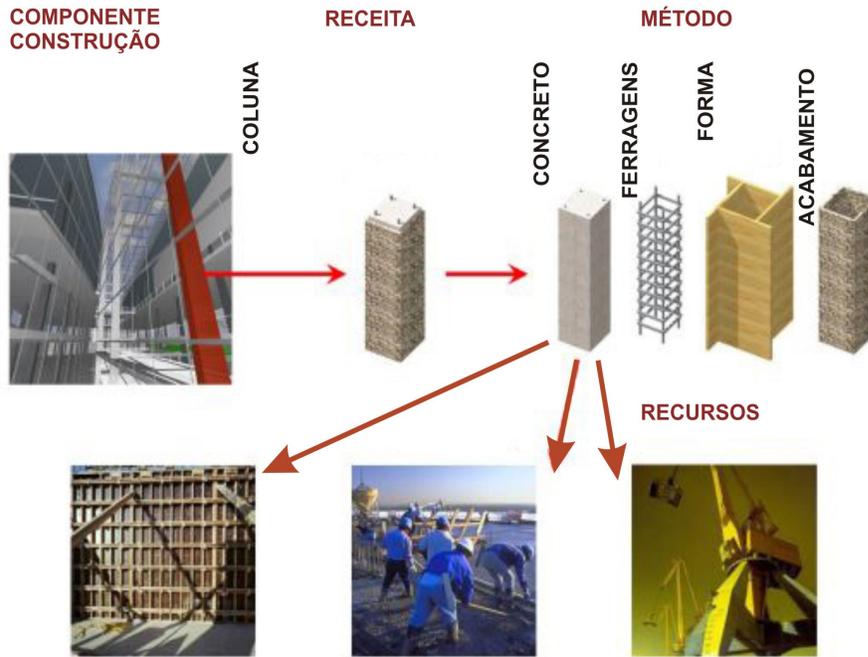
4.3.4 Características de um objeto paramétrico

Conforme Eastman *et al.*, (2008), os objetos paramétricos apresentam quatro características principais:

- Estrutura topológica - estabelece a disposição física do objeto paramétrico. A definição da topologia e do tipo de conexão são aspectos críticos que devem estar definidos nas ferramentas BIM. A definição precisa da disposição física de um objeto é condição para uma estrutura coerente entre as partes do edifício, nas suas relações entre si e com o todo. Eastman *et al.* (2008) afirmam que a conexão de um objeto paramétrico traz consigo três importantes tipos de informação: o que pode ser conectado com o objeto; que tipo de conexão existe com o objeto; e como essa conexão é composta em resposta aos vários contextos.
- Propriedade e atributo - fornece informações do objeto que não estão explícitas na geometria. Permitem fornecer informações capazes de interpretar um determinado objeto, analisar, valorar (definir preços, por exemplo) e intercambiar - com outros aplicativos (EASTMAN *et al.*, 2008). Um objeto, por exemplo, uma coluna (Figura 4.8) pode ter propriedades associadas aos estágios de construção; para cada um desses estágios, podem existir descrições de recursos usados e tempo necessário para a execução do trabalho (GRAPHISOFT, 2007). A forma como as propriedades dos objetos podem ser orientadas em um determinado aplicativo pode dar-se do seguinte modo (Eastman *et al.*, 2008): predefinida numa biblioteca de objetos; os próprios usuários acrescentam as propriedades; as propriedades sejam especificadas automaticamente.
- Geração de desenhos - cada instância de objeto parametrizado de um edifício apresenta como características uma forma, propriedades associadas e uma disposição única no modelo (que não pode ser ocupado por outro objeto). A organização geral das instâncias dos objetos, com suas propriedades, formas e disposições, fornecem os instrumentos necessários para aplicativos de autoria BIM gerarem desenhos, relatórios e extraírem dados (Figura 4.9). Em razão da identidade única e não redundante dos objetos do edifício, os desenhos gerados, os relatórios e as análises de dados são consistentes e têm origem na mesma base de dados (EASTMAN *et al.*, 2008).
- Escalabilidade - o tamanho do modelo do edifício associa-se à sua “escalabilidade”. São dois os principais fatores que afetam a escalabilidade: o tamanho do projeto e o nível de granularidade (*Level of Granularity* - LOG) do modelo (nível de detalhe do modelo). Projetos simples podem apresentar problemas de escalabilidade se o LOG for muito grande; projetos complexos, com muitas informações e partes técnicas, tendem a

apresentar alto nível de escalabilidade (ABOULEZZ *et al.*, 2007). A boa escalabilidade se dá pelo uso de modelo que tenha as informações necessárias e suficientes para o projeto.

Figura 4.8 Receitas, métodos e recursos associados aos componentes de construção



Fonte: Adaptado de Graphisoft (2007)

Figura 4.9 Modelo integrado de informação do edifício



Fonte: Graphisoft (2007)

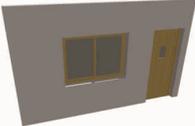
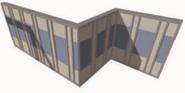
4.3.5 Modelagem Paramétrica em projeto de arquitetura

Eastman *et al.* (2008) diferenciam dois tipos de práticas de uso de objetos paramétricos em arquitetura: as práticas padrões e as práticas melhoradas. As práticas padrões refletem convenções de modelos paramétricos comumente empregados na indústria. Estão associadas à processo de projeto tipológicos, em que são empregados tipos de famílias de componentes convencionais. O crescimento no uso de aplicativos BIM para projetos de arquitetura vem acompanhado do aumento no número de famílias de componentes. Mesmo com uma grande variedade de famílias já existentes no mercado elas ainda se limitam a tipos de componentes padrões (paredes, lajes, vigas, pilares, esquadrias, peças sanitárias, etc.), produzidos corriqueiramente pela construção civil (Figura 4.10)¹⁴. Essas práticas possuem como limitação o fato de não acrescentarem casos especiais de famílias de objetos existentes no mundo real.

As práticas melhoradas possibilitam ajustes nos detalhes dos objetos, incorporando às exigências quanto a padrões de detalhes criados por projetistas e escritórios de projeto. Podem dar maior flexibilidade no uso de objetos paramétricos durante a atividade de projeto. As práticas melhoradas também devem ajustar-se à capacidade de empresas e projetistas em criar e definir as próprias bibliotecas de famílias de objetos paramétricos, de modo que possam expressar melhor as intenções de projeto (EASTMAN *et al.*, 2008). Geralmente se associam ao uso da modelagem paramétrica topológica. A grande vantagem está na flexibilidade de criação de famílias de objetos paramétricos. Com isso, o projetista pode utilizar novas formas, ainda não presentes nas famílias existentes.

¹⁴ No Brasil, em 2010 ainda eram poucos os componentes vinculados à produtos nacionais

Figura 4.10 Aplicativos de autoria BIM para arquitetura

	PAREDES		COBERTURAS
	PORTAS JANELAS ESQUADRIAS ESPECIAIS		PILARES VIGAS LAJES
	PAREDES CORTINAS		TRELIÇAS PLANAS
	ESCADAS RAMPAS ELEVADORES ESCADAS ROLANTES		TRELIÇAS ESPACIAIS
	BACIAS SANITÁRIAS LAVATÓRIOS BALCÕES COZINHAS ETC.		PÓRTICOS

Nota: Esses aplicativos são limitados para o uso em certas situações de projeto, embora exista grande variedade de famílias de componentes de construção disponíveis em softwares de autoria BIM

Fonte: Autoria própria

4.4 Interoperabilidade

4.4.1 A interoperabilidade na AEC

A interoperabilidade consiste na capacidade de troca de dados entre aplicativos computacionais. Se existe boa interoperabilidade, elimina-se a necessidade de réplica de dados que já tenham sido gerados e facilita-se o fluxo de informações entre diferentes aplicativos, durante o processo de projeto. Apesar das diversas tentativas, a interoperabilidade na AECO ainda não é tão bem-sucedida (ANDRADE; RUSCHEL, 2009), quando se compara com o que ocorre em outros setores da indústria (EASTMAN *et al.*, 2008). Entre os motivos, destacam-se:

desentendimento dos profissionais da indústria da AECO a respeito dos efeitos benéficos para o processo de projeto e construção; desinteresse por parte de empresas desenvolvedoras de softwares pela interoperabilidade, haja vista, que, com ela, diversas empresas parceiras não necessitarão utilizar pacotes de software de um único desenvolvedor (KIVINIEMI *et al.*, 2008).

Na prática, o que se observa é que poucas empresas e profissionais que utilizam ferramentas BIM buscam a interoperabilidade e a colaboração. Essa observação é comprovada por Kiviniemi *et al.* (2008) que demonstram que muitos dos profissionais da AECO utilizam softwares BIM como ferramentas de CAD melhoradas, sem, contudo, mudarem seus processos de trabalho já consolidados.

Para que se tenha uma boa interoperabilidade, é importante a implementação de um padrão de protocolo de troca de dados entre os aplicativos computacionais, durante o processo de projeto. O principal protocolo público usado hoje é o *Industry Foundation Classes* (IFC), que é um modelo de dados do edifício baseado em objetos, não proprietário. Na prática, o uso do IFC atende a requisitos para certas tarefas, deixando, contudo, que muitas outras tarefas não sejam suportadas por esse formato (KIVINIEMI *et al.*, 2008). Um dos maiores obstáculos para a adoção do IFC é a baixa robustez, quando utilizados nos aplicativos computacionais de autoria BIM. Assim, torna-se difícil um amplo e voluntário uso do IFC como protocolo preferido para troca de dados do edifício.

Ao mesmo tempo em que existe um grande desinteresse das organizações vinculadas à indústria da AECO pelo aperfeiçoamento da interoperabilidade, parece haver também desconhecimento por parte dos usuários sobre quais são os propósitos do uso do IFC. Isso, segundo Kiviniemi *et al.* (2008), é em decorrência de não existir uma cultura na AECO de reúso de dados.

4.4.2 A extensão da interoperabilidade com o BIM

Uma das vantagens da interoperabilidade é a possibilidade de combinar diferentes áreas de ação da AECO no modelo geométrico do edifício. Embora a maioria das atividades não ocorra num único modelo, elas podem utilizar modelos comuns de informação para troca de dados entre diferentes softwares. Dessa forma, eliminam-se réplicas e sobreposições de modelo

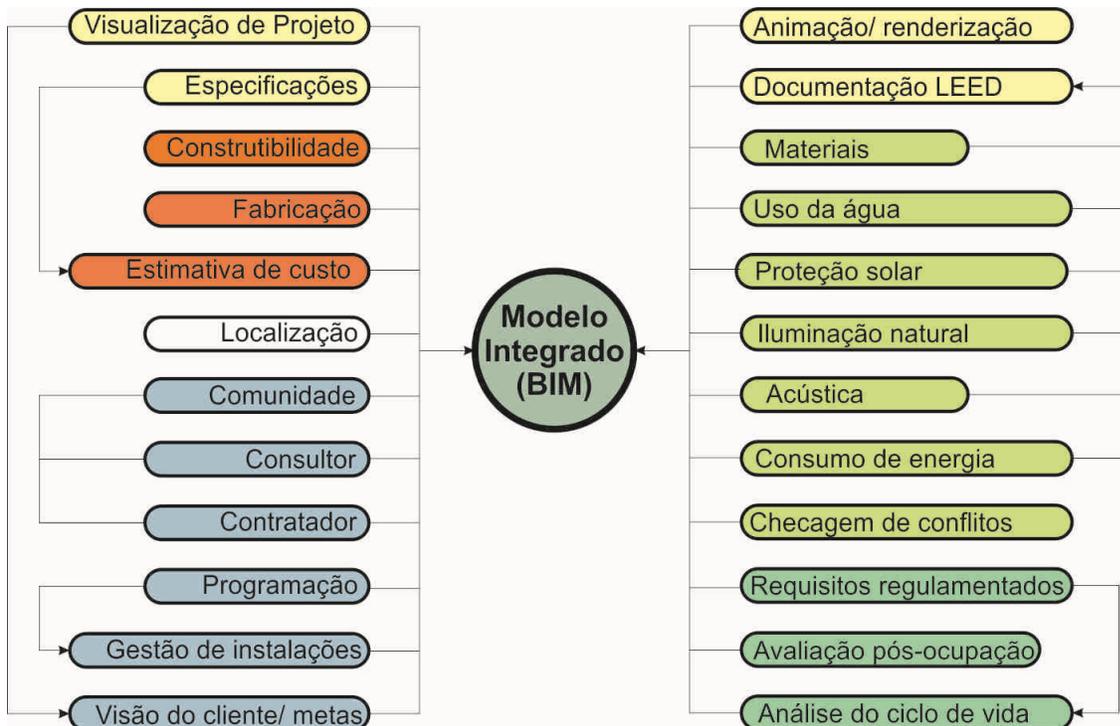
geométrico do edifício e possibilitam-se maiores consistências e rigores dos dados dos modelos utilizados em diferentes aplicativos.

A adoção do BIM representa a criação de um banco de dados orientado ao modelo de informação da construção. Krygiel e Nies (2007) mostram que, com a interoperabilidade dos modelos BIM, é possível:

- Exportar modelo geométrico - o modelo geométrico do edifício pode ser reutilizado em diferentes aplicativos de análise (análise de energia solar, iluminação natural, etc.).
- Exportar quantitativos - é possível exportar facilmente quantitativos de materiais e componentes (áreas, volumes, espaços, etc.) gerados por meio dos modelos de construção orientados a objetos.
- Comunicar - a interoperabilidade dos modelos BIM pode permitir que informações geradas instantaneamente nos modelos, sobre as diferentes partes do edifício e sobre questões-chave do processo de projeto, possam ser passadas para diferentes profissionais, de acordo com suas necessidades.

Além das possibilidades apresentadas acima, os modelos BIM foram concebidos visando compartilhar as informações do edifício entre as diferentes equipes de profissionais. Para isso, a interoperabilidade torna-se peça-chave no sentido de permitir articular propriedades diferentes entre disciplinas (Figura 4.11), dentro de múltiplos softwares utilizados na AECO.

Figura 4.11 Áreas de interesse que podem estar integradas no modelo BIM



Fonte: Krygiel; Niel (2007, p. 76)

4.4.3 Interoperabilidade e formatos de trocas de arquivos digitais

O fluxo de dados em aplicativos de autoria BIM pode ocorrer por meio de: dados de troca e dados de intercâmbio (SUCCAR, 2009). O fluxo de dados de troca ocorre quando são exportados ou importados dados que não são estruturados nem computáveis. Um exemplo típico é quando se exporta para um aplicativo BIM um desenho de CAD 2D. Nesse caso, uma possível riqueza de geometria e de dados semânticos deixa de existir. O fluxo de dados de intercâmbio dá-se quando se exportam ou importam dados que são estruturados e computáveis por outros aplicativos. Esse intercâmbio assume uma interoperabilidade adequada com os sistemas que enviam e recebem, quando as informações de troca e de utilização permanecem sem perdas ou com poucas perdas (SUCCAR, 2009).

Existem basicamente quatro diferentes maneiras de realizar o fluxo de dados de intercâmbio de dois aplicativos BIM (EASTMAN *et al.*, 2008):

- ligação direta (exemplo: GDL, MDL);
- formato de arquivo de troca de proprietário (exemplos: DXF, 3DS);
- formatos de arquivos de troca de domínio público (exemplos: IFC, CIS/2);
- formatos de troca baseados em *eXtensible Markup Language* (XML) (exemplos: XML, gbXML).

Os dois principais modelos de troca de dados de domínio público do produto da construção civil são o *CIMsteel Integration Version 2* (CIS/2) e o *Industry Foundation Classes* (IFC). O CIS/2 é um formato desenvolvido para ser usado em projetos e na fabricação de estruturas em aço. O IFC é um formato aberto, neutro e com especificações padronizadas para o BIM. O IFC é um formato para ser usado no planejamento do edifício, no projeto, na construção e gerenciamento. Segundo Fu *et al.* (2006), é um tipo de linguagem que foca na modelagem do produto e processos da indústria da AECO. O IFC é, de acordo com a International Alliance for Interoperability (2008), o principal instrumento pelo qual é possível estabelecer a interoperabilidade dos softwares da AECO.

Bell e Bjørkhaug (2006) colocam como formato base para ser usado num edifício inteligente IFC agregado ao *Information Framework for Dictionary* (IFD) e ao *Information Delivery Manual* (IDM). Haagenrud *et al.* (2007) afirmam que o IFD consiste no desenvolvimento de uma biblioteca internacional de objetos para a indústria da AECO que seja compatível com o IFC e possa ser utilizado para obter informações mais detalhadas dentro e fora de um projeto de edifício. O IFD é uma identidade alternativa para o modelo conceitual da ISO 12006 Parte 3. Com o IFD, é possível criar uma identidade própria ao objeto (identidade única), o que facilita a interoperabilidade.

O IDM é o conjunto de mapas de processos, requisitos de trocas, partes funcionais, regras de atividades e diretrizes BIM que permite um processo de troca de informações dentro de um projeto (HAAGENRUD *et al.*, 2007). É um padrão que define qual especificação de uso um objeto deve ter. O IDM estabelece que tipo de informações deve ser passada de um projeto arquitetônico para a realização de um projeto de instalações elétricas, por exemplo. O uso dessas linguagens de comunicação tem permitido a exploração de ferramentas capazes de ler dados referentes a questões múltiplas de informação do projeto, como questões de acessibilidade, sustentabilidade, eficiência energética, custeio, acústica, térmica, etc.

Outro modo de troca de dados, alternativa ao IFC, é o formato *Extensible Markup Language* (XML). Este, de acordo com a OASIS (2005), descreve uma classe de objetos de dados chamado documentos XML. O formato XML surgiu como uma extensão do HTML, que era a linguagem usada para troca de dados na web.

4.4.4 Interoperabilidade por meio dos portais BIM Web

Mesmo com todas as tentativas de melhoria da interoperabilidade entre os setores da AECO, o que Onuma e Davis (2006) mostram é que tanto o IFC como os outros formatos de troca de dados ainda precisam melhorar a robustez nos arquivos e tradutores. Uma alternativa para aumentar a interoperabilidade dos aplicativos BIM é o uso das tecnologias de portais da web. O surgimento de portais da web voltados para o BIM tem permitido a melhoria significativa da produtividade no processo de projeto, construção e gestão de edifícios. Com esses portais, muitas organizações têm conseguido ganho de desempenho nos seus processos de projeto e construção do edifício, com maior envolvimento de pessoas no uso de ferramentas computacionais (ONUMA; DAVIS, 2006).

O uso de um portal BIM Web melhora a interoperabilidade, possibilitando maior coerência nas decisões, com ações mais interdisciplinares, e um processo de geração de soluções de projeto mais rápida e precisa. Com esses portais, os usuários deixam de se preocupar com complexos processos de integração de informações da construção e passam a se preocupar simplesmente com as interfaces que estão mais familiarizadas, sem, contudo, deixar de aproveitar as vantagens da interoperabilidade (ONUMA; DAVIS, 2006).

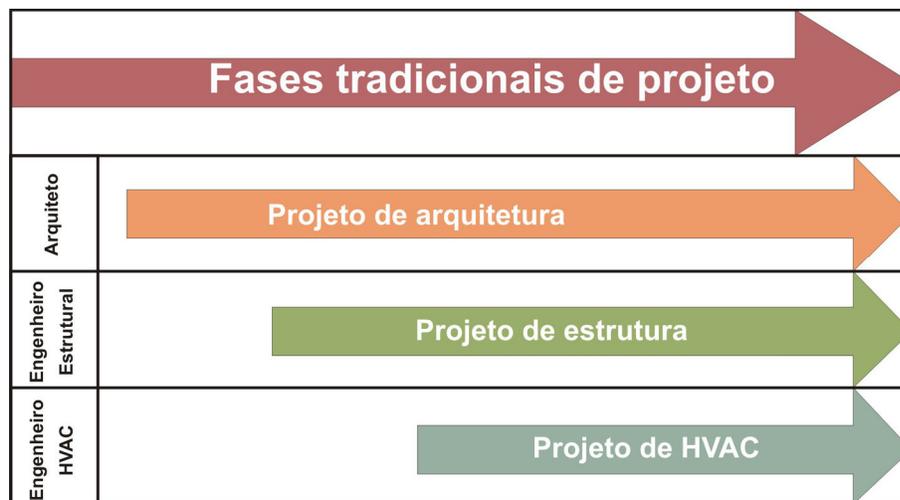
4.5 O Processo de Projeto de Arquitetura com o BIM

4.5.1 O projeto integrado e o BIM

A ideia de uma prática de projeto integrado deveria ser inerente à indústria da construção civil, porém é muito comum que as fases de programa, projeto, construção e operação sejam pouco articuladas. Mesmo na fase de projeto, é comum haver falta de integração de projetos de arquitetura, estrutura, instalações, projetos especiais, etc. Projetos arquitetônicos, por exemplo, muitas vezes apresentam falta de integração das fases de concepção, anteprojeto, projeto executivo, detalhamento, etc.

Tradicionalmente, a integração do projeto ocorre após a etapa de concepção arquitetônica. Questões relacionadas com a engenharia estrutural, HVAC, custos, etc., são discutidas nas fases posteriores do processo de criação da concepção da forma, quando várias decisões de projeto já foram tomadas (Figura 4.12). Nesse caso, as funções de outros projetistas tornam-se limitadas a sugerir melhoria de desempenho, dentro das restrições possíveis, resultando em um aumento marginal do desempenho da solução (TRELDAL, 2008, p. 8).

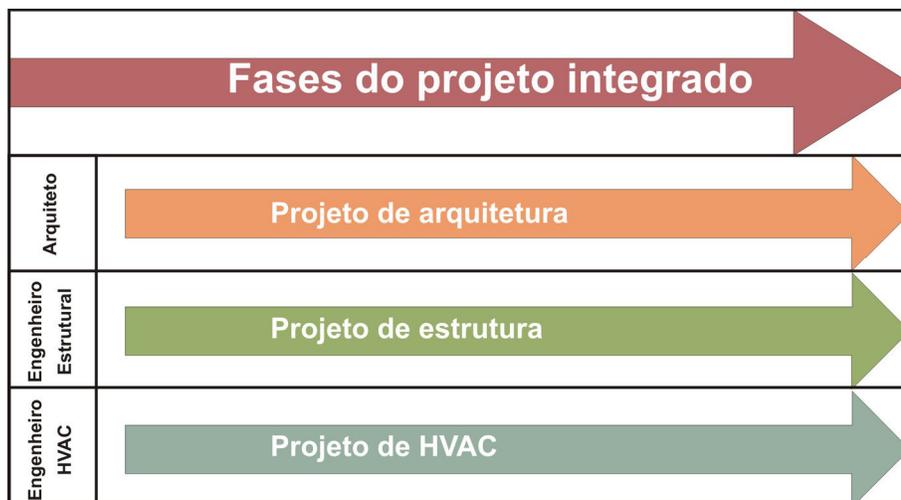
Figura 4.12 Forma de integração dos membros da equipe durante as fases de um projeto tradicional



Fonte: Treldal (2008, p 8)

Para evitar isso, Marsh (1997) recomenda que os projetistas trabalhem o projeto integrado já nas etapas iniciais de concepção (Figura 4.13). O projeto integrado, segundo Trelidal (2008, p. 10), pressupõe um processo inteiramente multidisciplinar de tarefas de projeto, em que equipes de projetistas perseguem continuamente uma série de metas de projeto, desde o início, e as otimizam ao longo de todo o processo de projeto. Para isso, é importante: a inclusão de profissionais especializados de diferentes domínios nas equipes de projeto, já nos estágios iniciais do processo de projeto; o uso de tecnologias computacionais que deem suporte a diferentes áreas do conhecimento, ainda na etapa conceitual do projeto arquitetônico.

Figura 4.13 Forma de integração dos membros da equipe durante as fases de um projeto integrado



Fonte: Trelidal (2008, p. 9)

A prática de projeto integrado deve ter como objetivos mínimos: o uso de uma abordagem holística; a concentração dos esforços nas primeiras fases de projeto; e ter como foco, durante todo o processo de projeto, as metas de desempenho (TRELDAL, 2008). Com essa prática, é possível coordenar as decisões de projeto, de modo a conciliar as soluções de diferentes domínios envolvidos desde o início do processo de projeto.

A eficiência de uma prática de projeto integrada também se apoia no uso do BIM. Com o BIM, aumenta-se a interoperabilidade de softwares utilizados em diferentes tipos de projeto, auxiliando na colaboração entre projetistas, e entre estes, construtores e fabricantes; além de ser um importante instrumento de tomada de decisão. Com o BIM, melhora-se o gerenciamento e o controle do fluxo de informação, repercutindo na melhoria da prática integrada. Trelidal (2008)

defende a tese de que, embora o BIM não seja condição para uma prática integrada, é um potencializador, podendo melhorar significativamente sua eficiência.

4.5.2 Revisão do processo de projeto arquitetônico com o BIM

Baseado nas tecnologias de modelagem paramétrica e na interoperabilidade, o BIM pode trazer melhoria na integração e no fluxo de informações durante o processo de projeto de arquitetura (EASTMAN *et al.*, 2008). Para isso, é importante que também ocorram mudanças na cultura da prática de projeto (BIRX, 2005) com transformações em quase todos os aspectos que envolvem essa prática.

No projeto arquitetônico, é importante uma antecipação de atividades realizadas na etapa de desenvolvimento para as fases iniciais do projeto (FLORIO, 2007), haja vista que o BIM implica redistribuição nos esforços projetuais, dando maior ênfase à concepção. Essa mudança na forma de pensar o fazer arquitetura está na transformação do processo de projeto que deixa de priorizar a representação abstrata, com convenções fragmentadas de comunicação, para privilegiar a construção contextual, apoiada numa simulação inteligente da relação espaço-forma (AMBROSE, 2006).

Nesse contexto, os arquitetos passam a gastar mais tempo projetando e menos tempo desenhando. O grande potencial do uso do BIM em projeto está na possibilidade de revigorar a prática contemporânea da arquitetura pelo desenvolvimento e exploração do processo de projeto e de metodologias que deem prioridade a formas de ver, pensar e criar durante o processo de projeto. Com isso, pode-se aumentar o espaço de soluções, vislumbrando-se opções que dificilmente seriam pensadas na forma analógica de projetar.

Essa nova maneira de projetar provoca mudanças no nível de detalhe das soluções propostas e pode requerer, de acordo com o perfil do projeto, o uso de componentes (reais – representados virtualmente) baseados em modelos da construção, já nas primeiras etapas do lançamento do partido (PENTTILÄ, 2007). Para esses casos, o processo de projeto passa a apoiar-se num modelo central de informações em vez de uma simples modelagem geométrica 3D (GUIDERA, 2006). Pensar no edifício com os componentes é uma maneira de substituir a abstração pela simulação (AMBROSE, 2006). O edifício passa a ser construído literalmente (de

modo virtual): a concepção do espaço expressa o espaço, a concepção da forma expressa a forma. Substitui-se a tradicional convenção abstrata usada na representação (plantas, cortes e fachadas) por uma simulação, expressa no modelo de objeto inteligente, como saída antiabstração. Desse modo, o modelo torna-se mais próximo da tectônica arquitetônica, com a valorização da lógica material da construção física (PIÑÓN, 2008).

Dentro dessa nova maneira antiabstração, antifragmentação, anti-isolamento do processo de projeto, para um suportado por uma relação contextual, expressa no ambiente de modelagem e nos dados a ele atrelados, passa-se a reconhecer, de modo mais nítido, a supremacia do todo sobre as partes, estabelecendo uma relação holística no projeto arquitetônico (AMBROSE, 2006). Nesse momento, a análise, síntese e avaliação do projeto arquitetônico passam a ser, cada vez mais, sobrepostas.

Uma das primeiras decisões que devem ser feitas está em estabelecer com clareza o objetivo do projeto e os critérios de desempenho que o edifício deve satisfazer. É também importante definir o papel da modelagem do edifício, o perfil da equipe que vai participar do projeto, os recursos que serão disponíveis, os benefícios do modelo, o formato de arquivos usado, o modo de realizar a interoperabilidade (ABOULEZZ *et al.*, 2007), etc. Para o projeto arquitetônico, por exemplo, certos níveis de detalhe podem ser considerados desnecessários ou extremamente importantes. Estes devem ser definidos *a priori*.

Outra grande mudança no processo de projeto com o BIM vem com a necessidade de trabalhar o projeto de modo colaborativo, baseado numa prática integrada (discutida na seção anterior). A transposição de um modelo de tomada de decisão hierárquico e sequencial por um modelo baseado na colaboração pode resultar em mudança na estrutura do projeto arquitetônico, que passa, cada vez mais cedo, por processos de compatibilização.

Cabe destacar a existência de dois grupos de tomada de decisão com o BIM: uma de caráter mais arquitetônico e outro mais operacional. No primeiro, de caráter mais arquitetônico, valorizam-se os desempenho a serem alcançados pelas soluções arquitetônicas e estimulam-se o crescimento no espaço de soluções. Relaciona-se com a sequência de decisões e com a natureza exploratória do processo de projeto; apoia-se na computação. Esse é ainda pouco discutido nas pesquisas em BIM. O outro, mais operacional, de caráter de gestão e planejamento, integração e

sistematização de trabalho, relaciona-se com o fluxo de informação no processo de projeto; apoia-se na informatização.

Pensar o BIM do ponto de vista da sequência de decisões significa uma mudança na forma de pensar o processo de projeto arquitetônico, com o fortalecimento do conceito. No conceito, estabelecido no programa arquitetônico, estão expressas a ideologia, a ética, as afinidades com as formas/ espaços arquitetônicos, os princípios, maneiras de pensar o lócus, o modo de dialogar com o cliente, enfim, os condicionantes gerais que vão direcionar a maneira de projetar. Com o BIM, muitas das informações que vão embasar o conceito poderão ser mais facilmente adquiridas e visualizadas, inclusive, influenciando no discurso e na formatação do conceito. Além do mais, com o BIM, certos conceitos – que vão definir posturas projetuais e vão ser expressos na escolha dos critérios de desempenhos das soluções arquitetônicas – precisarão estar definidos com antecedência, o que pode resultar numa discussão preliminar e no aprofundamento de uma base conceitual para o projeto.

Diante das considerações expostas acima, a implantação do BIM só trará ganhos efetivos quando vinculados a novos métodos de projeto arquitetônico digital. Métodos baseados na modelagem paramétrica, na interoperabilidade e que incorporem: a diluição da divisão entre etapas de concepção e desenvolvimento, visando fortalecer a concepção arquitetônica (FLORIO, 2007; EASTMAN *et al.*, 2008); a construção contextual; a redefinição no nível de detalhe da solução proposta em função do processo projetual; o desenvolvimento do projeto num modelo de informação compartilhada; o pensamento mais voltado para a lógica do material da construção; e o desenvolvimento de projetos mais colaborativos (AMBROSE, 2006; PENTTILÄ, 2007; GUIDERA, 2006). Para isso, é importante: a revisão nas atribuições profissionais; a modificação no perfil de remuneração e documentação; novas delimitações e maior clareza nos objetivos do projeto; e a utilização de formatos que possibilitem maior interoperabilidade.

4.5.3 Avaliação de soluções arquitetônicas com o BIM

Uma das principais contribuições para o processo de projeto com o BIM vem com a incorporação, ainda na etapa conceitual, de mecanismos para avaliação automática das soluções de projeto. Por meio da avaliação de diferentes aspectos do projeto, já a partir dos primeiros

riscos, o arquiteto vai fundamentando sua proposição e analisando os indicadores de qualidade do projeto arquitetônico. Eastman *et al.* (2008) descrevem a avaliação no BIM como uma operação de medição da variação de parâmetros de desempenho que são esperados na construção real.

Ferramentas de avaliação, com o BIM, podem ser usadas na etapa de concepção e no desenvolvimento do projeto arquitetônico, com enfoque em diferentes nuances do projeto. É na etapa de concepção que as decisões arquitetônicas tomadas influenciam mais o custo, o desempenho e a qualidade da edificação. Nessa etapa os softwares podem ser usados na avaliação de: não conformidades no planejamento dos espaços, condições de conforto ambiental, estimativas de custos, consumo energético, não conformidades com os códigos e legislações, etc. Há inúmeros softwares no mercado para avaliar o projeto, como *Solibri, Trelligence Affinity, Visio Space Planner, Energy-Plus, Ecotect, DesignBuilder, PACES, NavisWork, Space Planning Tool*. Esses permitem aos projetistas fazerem, durante a concepção do projeto, sucessivas avaliações num curto intervalo de tempo; podem melhorar as ações de projeto e resultar em soluções mais coerentes com os requisitos de desempenho estabelecidos no programa arquitetônico.

Por outro lado, a maioria dos softwares de avaliação: não apresenta uma estrutura funcional eficiente para auxiliar os projetistas nos estágios iniciais do processo de concepção arquitetônica, pois são baseados em critérios, que, muitas vezes, ainda não foram definidos nos primeiros esboços do projeto; apresenta um baixo potencial de interoperabilidade; precisa incorporar a capacidade de suportar o pensamento intuitivo e criativo do arquiteto, expresso nas soluções propostas; precisa ser capaz de responder a essas solicitações com simulações e avaliações rápidas.

O emprego de diversificados softwares de suporte ao projeto requer um fluxo contínuo de informações entre eles. Esse processo de intercâmbio apresenta dois padrões de troca: fluxo em uma direção: a informação sai do software de autoria BIM para o de avaliação (são unidirecionais); fluxo em duas direções: a informação sai dos softwares de autoria BIM para os softwares de avaliação e trazem de volta os resultados das avaliações (são bidirecionais).

No desenvolvimento do projeto arquitetônico ocorrem os detalhamentos e especificações do projeto. Neste estágio, o trabalho do arquiteto passa a ser mais do que nunca colaborativo e as resoluções dos problemas deverão estar compartilhadas com os demais especialistas. Para

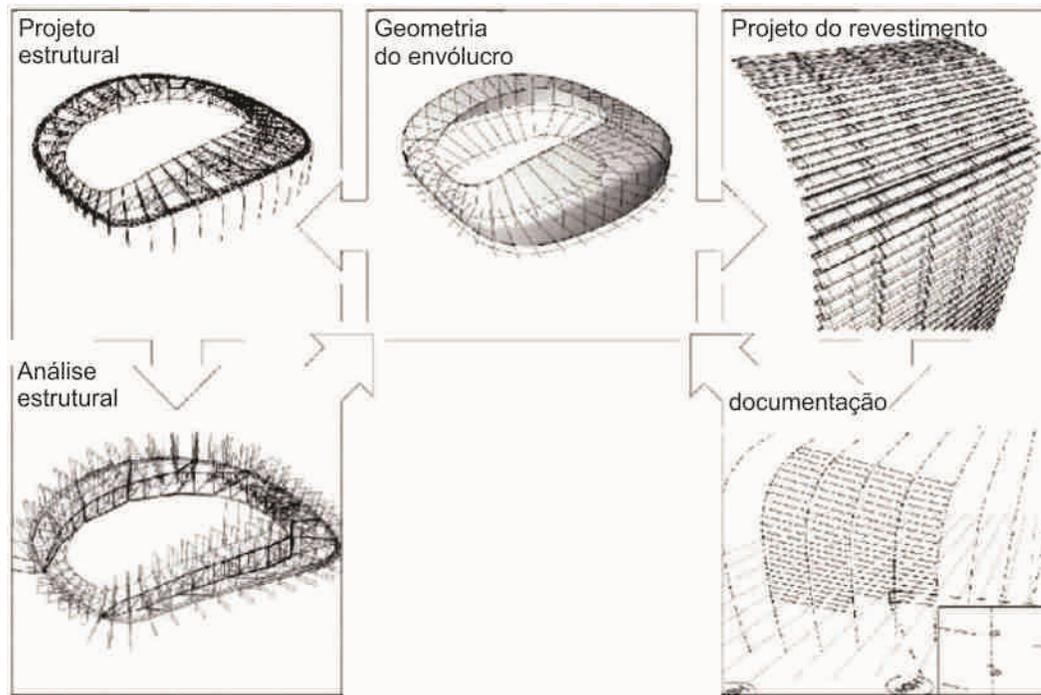
isso, é importante o compartilhamento do modelo, de modo que múltiplos especialistas possam avaliar os problemas do projeto arquitetônico sobre as diversas nuances e colaborativamente discutirem com as equipes de projetistas eventuais conflitos de projetos.

4.5.4 Concepção da forma arquitetônica com o BIM

Diversas experiências recentes mostram o uso do BIM nos estágios de concepção do projeto. Em algumas delas, o BIM se associa a métodos baseados em Modelos CAD para Avaliação; em outras situações, associam-se a Modelos Performativos. Em ambos, o uso da interoperabilidade e parametrização possibilita um processo de projeto contínuo, flexível com viabilidade de admissão de rápidas alterações no modelo.

No estudo de caso do Aviva Stadium (Figura 4.14), Eastman *et. al.* (2011) mostram a importância da tecnologia da modelagem paramétrica para a proposta. Usando um método baseado no Modelo Performativo, os escritórios Populous (Arquitetura), Buro Happold (Engenharia), conseguiram gerar a forma da cobertura do estádio de modo eficaz. Esse processo de projeto colaborativo possibilitou que mudanças fossem relativamente rápidas e fáceis no modelo, reduzindo os ciclos de avaliação e otimização.

Figura 4.14 Modelo de processo de projeto que integra ferramentas de avaliação e otimização

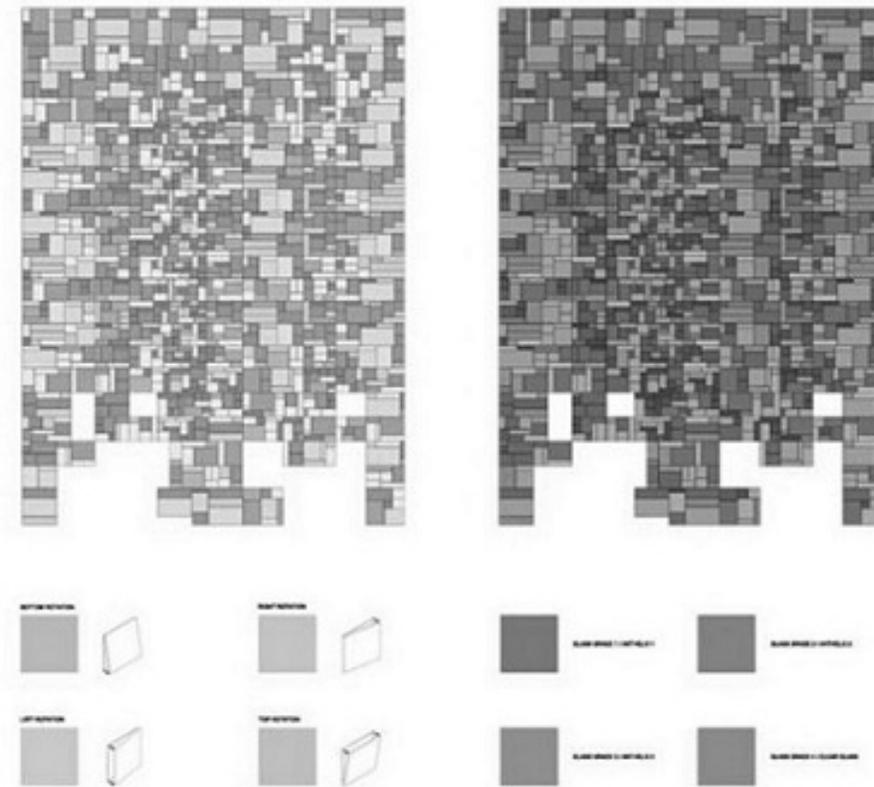


Nota: Um sistema automatizado possibilitava gerar dados para análise e simulação, sem a intervenção humana

Fonte: Eastman et. al. (2011, p. 422)

No projeto do Condomínio Residencial 100, localizado na 11th Avenida em Manhattan (Nova York, EUA), Jean Nouvel (arquitetura), com DeSimone Consulting (engenharia), desenvolveram um projeto de uma fachada de vidro, cuja função é transformar em um elemento icônico da arquitetura local, além de responder a questões ambientais, de insolação, de fabricação e de montagem (Figura 4.15). Para resolver a complexidade do projeto, foi estabelecido um modelo computacional definido por uma série de linhas reguladoras que criavam uma hierarquia baseada em parâmetros estabelecidos em um esboço do arquiteto. Por meio do Modelo parametrizado baseado num banco de dados de informações centralizadas, a complexidade da forma da parede cortina, as estimativas de custo, o desempenho do edifício, o cronograma de construção e os resultados esperados puderam ser ponderados com grande precisão. Usando o recurso de um modelo centralizado, arquitetos, engenheiros, contratadores e fabricantes puderam discutir mudanças nas soluções de maneira rápida e eficiente (EASTMAN et al., 2011).

Figura 4.15 Mapa mostrando ângulo e direção da rotação dos componentes (quadro esquerdo) e tipo de material (quadro direito) usados na fachada do Condomínio Residencial 100

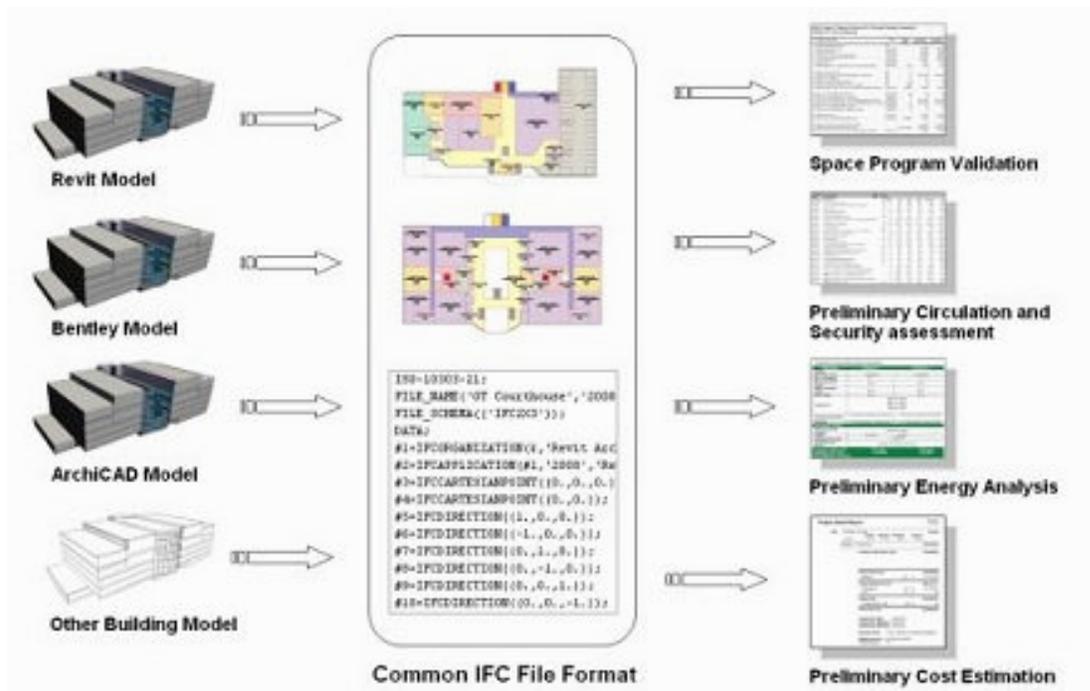


Nota: Por meio de um modelo paramétrico, mudanças na fachada eram feitas e testadas de modo rápido

Fonte: Eastman et. al. (2011, p. 517)

Eastman (2009), por meio de estudos em projetos de cortes de justiça Americana, mostra como diversas ferramentas podem ser utilizadas na etapa de concepção da forma avaliando de modo automatizado diferentes concepções em termos de acessibilidade dos espaços, conectividade, eficiência energética e custo (Figura 4.16). Baseado no BIM, os autores propõem um método de trabalho baseado no Modelo CAD para Avaliação a ser usado em projetos de cortes de justiça visando a escolha de melhores soluções de projeto, de modo rápido e preciso. Por meio desse processo, os projetistas têm maior certeza na escolha das soluções, repercutindo num processo de projeto mais rápido e possibilitando a ampliação do espaço de soluções.

Figura 4.16 Tipos de análises efetuadas no modelo do edifício: validação espacial, avaliação de conectividade de espaços, análises energéticas e estimativas de custos



Fonte: Eastman (2009, p. 3)

4.6 Considerações Finais

Apesar dos grandes benefícios econômicos e as aparentes melhorias na qualidade do projeto com o advento do BIM, este ainda não é usado de modo eficiente nas diferentes fases do projeto. É importante uma mudança na cultura do projeto, com a definição de novos métodos de projeto e revisão dos fluxos de informações, de modo que a informação chegue correta, para a pessoa certa e na hora certa.

As informações dos modelos, que se deslocam por todo o ciclo de vida do edifício, só são utilizadas em um determinado momento. Essas informações precisam ser constantemente atualizadas, e deverão “potencialmente produzir eventos em outros níveis de heterogeneidade

nos sistemas que são, por definição, imprevisíveis” (HERMUND, 2009, p. 80).¹⁵ Esse estado de instabilidade e imprevisibilidade, que teoricamente deveria ser característico do BIM, é conflitante com a ideia dele como algo absolutamente controlado. Esse último conceito é indesejável, principalmente, ao considerar o ponto de vista do projeto de arquitetura.

Nesse sentido, é importante pensar o BIM como sensível ao longo do tempo, de modo a não implicar algo restrito a sistemáticas predefinidas e rotinas. Dentro desse ponto de vista, Hermund (2009) observa que o BIM deve ser compreendido como um processo que deve refletir os impactos mentais das mudanças de paradigmas do projeto digital. Esses impactos devem estar associados a um processo que envolve a criação, a pesquisa, apoiadas em uma nova tecnologia que possa contribuir com esse ciclo originando algo inesperado. Pensar uma sistemática como essa significa pensar uma nova abordagem da tecnologia como instrumento de um novo pensamento para a pesquisa e para a arquitetura.

Ao incorporar a capacidade de tratar com o inesperado e com o incomensurável, o BIM poderá trazer efetivos benefícios para o processo de projeto de arquitetura. Isso significa a não formalização de etapas de investigação do processo criativo, de modo a tornar o sistema mais flexível e mais adaptado a mudanças. Uma maneira sugerida por Ibrahim *et al.* (2004) de fazer isso é por meio do BIM num sistema distribuído em vez de integrado. No sistema distribuído, o modelo do edifício do arquiteto deverá ser considerado como um modelo de referência. Este pode apontar para diferentes modelos fora de si, em que as informações necessárias são armazenadas, sem a necessidade de incorporá-las em um único modelo digital. Os diferentes sistemas especializados podem comunicar por meio de um modelo, e cada sistema é responsável por cumprir um papel específico e passar as informações convenientes para os demais modelos (IBRAHIM *et al.*, 2004). O uso de um modelo distribuído pode garantir que se trabalhe com criatividade em sistemas dessa natureza.

Experiências recentes em processos de projeto digital revelam a importância do BIM para a exploração de novos conceitos em arquitetura, relacionados com a sustentabilidade e a melhoria do desempenho das soluções. Algumas dessas experiências serão abordadas no próximo capítulo à luz dos fundamentos do Projeto Performativo.

¹⁵ No original: “potentially produce events on other heterogeneous levels in the system that by definition are unpredictable”

5 A PRÁTICA DO PROJETO DIGITAL PERFORMATIVO:

Estudos de caso

5.1 A Formulação dos Estudos de Caso

5.1.1 Estrutura conceitual e objetivos

O recente desenvolvimento da prática de Projeto Performativo tem resultado em mudanças significativas nos métodos tradicionais de projeto, com revisão das teorias, metodologias e processos de produção. Essas mudanças implicam uma reorientação nos domínios de conhecimento dos projetistas, no emprego de novas tecnologias no processo de projeto e na redefinição do papel e das atividades dos profissionais de projeto. Com o processo de Projeto Performativo, a relação entre o projetista e os componentes do projeto digital passa a ser mais explícita. Aumenta-se o grau de automatização.

Visando mapear essas mudanças no processo de projeto, este capítulo investiga os fundamentos das ações projetuais (processos) e das decisões (sínteses) características do Modelo de projeto digital Performativo à luz de estudos de caso e dos fundamentos teóricos apresentados nos capítulos antecedentes. A forma encontrada para investigar e compreender essas mudanças foi por meio da sinergia entre a prática e a teoria (Figura 5.1). A prática, responsável pelo projeto pode ser enriquecida pelo meio acadêmico que propõe novos métodos de trabalho e revisão de posturas. O meio acadêmico depende da prática para avançar as investigações teóricas e criar posturas críticas sobre a prática. A investigação, envolvendo um ambiente híbrido de pesquisas teóricas com estudo da prática de projeto, instrumentada por entrevistas e pesquisa experimental, permitiu enriquecer o campo de conhecimento da área com

a postulação de Estrutura Conceitual (cf. Capítulo 6) e experimentação de um método Performativo aplicado em ateliê de projeto (cf. Capítulo 7).

Figura 5.1 Ambiente híbrido entre teoria e estudo da prática utilizado na tese



Fonte: Adaptado de Holzer (2009)

Com base nesse ambiente híbrido, este capítulo tem como objetivo compreender como diferentes métodos de projeto digitais empregam o desempenho como instrumento de geração e de transformação da forma arquitetônica, suportada pelo BIM. O ponto de partida está na identificação e caracterização, em estudos de caso de projeto digital baseado no Modelo Performativo, dos componentes relacionados com domínios de conhecimento, atividades e instrumentação.

Como objetivos específicos deste capítulo estão:

- escolher estudos de caso que sejam representativos de uma prática de geração da forma baseada no Modelo Performativo;
- definir protocolos de análises, a partir de categorias de decisões e ações de projeto a serem identificadas nesse modelo de projeto digital;
- entender como essas categorias se comportam nos estudos de caso;
- classificar métodos de projeto digital de acordo com essas categorias;
- caracterizar o Modelo de projeto digital Performativo de acordo com os métodos usados.

Para isso, buscou-se identificar e compreender nos estudos de caso selecionados:

- o fluxo de informação;
- os modelos (ex. performativo, generativo, etc.);
- as técnicas (ex. paramétrica, algoritmo genético, gramática da forma, etc.);
- nível de automação (ex. automático, semiautomático, etc.);
- tipo de software;
- perfil da colaboração;
- as relações, as posições, a natureza da interação de projetistas e destes com outros profissionais e com o meio digital;
- o tipo de controle do processo de projeto e os conhecimentos requeridos pelos projetistas;
- estágios do processo de projeto analógicos e digitais.

O ponto de partida foi a escolha de exemplares de projeto que utilizam processos de projeto seguindo o Modelo Performativo para realizar estudos de caso. Em seguida, foram formulados de protocolos de análises. Estes foram expressos em categorias de análise dos Métodos de projeto digital Performativos. Definidos as unidades-caso e os protocolos de análises, empreenderam-se os estudos de caso. Após a realização dos estudos de caso, efetuaram-se análises comparativas entre os métodos, resultando numa classificação das principais características dos métodos usados com base nos protocolos analisados.

5.2 A Delimitação das Unidades-Caso e Formas de Coleta de Dados

5.2.1 Amplitude das unidades-caso

Definida a importância de realização de estudo de caso, opta-se por utilizar a estratégia de abordar o estudo de certa variedade de casos, porque só por meio da compreensão de uma variedade de casos, seria possível entender as principais características do modelo performativo. Os casos constituem-se os processos de geração da forma dos edifícios. Em cada estudo de caso, analisou-se o processo de geração da forma sob o ponto de vista de apenas uma equipe de projetista participante do projeto.

Outra estratégia para a realização do estudo de caso seria delimitar o estudo a uma unidade-caso, estudando profundamente o processo de geração da forma de um único projeto. Em virtude do tempo limitado da pesquisa de doutorado e de restrição orçamentária, seria inviável buscar outros estudos de caso. O aprofundamento se daria na análise mais detalhada das contribuições de todos os envolvidos no processo de geração da forma, porém, descartou-se essa estratégia já nas discussões iniciais.

Abordar o estudo de certa variedade de casos, definidos por fenômenos multifacetados, significou estudar processos de geração da forma nos projetos considerados como a melhor expressão do “tipo ideal” da categoria estudada. Nesse caso, a análise mais detalhada se deteve nas contribuições de uma das categorias profissionais envolvidas no processo de geração da forma, o arquiteto ou o engenheiro estrutural. Nesta abordagem diminuiu-se a compreensão global do fenômeno, porém os resultados obtidos neste tipo de delineamento foram mais precisos e significativos, pois permitiu compreender diferentes fenômenos relacionados com a geração da forma.

Embora o uso desse procedimento não tenha permitido isolar o fenômeno em todos os seus aspectos, possibilitou uma visão variada de diferentes fenômenos relacionados com o processo de geração da forma. Além disso, pelo fato de serem projetos essencialmente colaborativos, foi possível compreender, com a visão de um projetista (arquiteto, por exemplo), ações projetuais desenvolvidas por outro projetista (engenheiro estrutural, por exemplo).

A revisão bibliográfica possibilitou a obtenção de informações complementares sobre o papel e a ação de outros profissionais envolvidos no processo de geração da forma.

5.2.2 Delimitação das unidades-caso

Os procedimentos utilizados para a delimitação das unidades-caso foram: revisão da literatura sobre a produção de edifícios baseados no projeto digital performativo; escolha de projetos considerados exemplares dessa prática; escolha de escritórios de projeto que vêm desenvolvendo projetos de edifício supostamente utilizando modelos performativos; pré-seleção de escritórios de projeto e projetos mais representativos dessa prática; e seleção das unidades-caso.

O primeiro passo foi identificar as fontes bibliográficas capazes de fornecer as informações necessárias para esta fase da pesquisa. A principal fonte bibliográfica utilizada nessa etapa inicial foi o livro “The new structuralism” (OXMAN, OXMAN, 2010). De posse de exemplos de projetos apresentados no livro (sob a égide do “Novo Estruturalismo”) e de discussões com a professora Rivka Oxman,¹⁶ partiu-se para a busca de outras fontes bibliográficas, algumas das quais citadas nesse livro. As principais fontes nesta etapa foram: livros, artigos científicos publicados em revistas internacionais, sites de internet, teses de doutorado, anais de congressos, seminários e outros eventos. Entre os autores consultados nesta segunda fase, estão Hensel, Menges, Weinstock (2010), Hensel, Menges (2008), Kolarevic (2003); Kolarevic, Malkawi (2005); Sasaki (2005); Oxman (2006, 2007, 2008a, 2008b, 2009a, 2009b); Holm *et al.* (2008); Eastman *et al.* (2008, 2011); Meredith, Sakamoto e Ferré (2008); Iwamoto (2009); Spuybroek (2009) e Huang; Xie (2010). Com essa exaustiva revisão bibliográfica, garantiu-se confiabilidade na definição da amostra, que teve como referência as principais publicações sobre o tema produzidas nos últimos anos.

Nesse conjunto de fontes, buscou-se identificar projetos desenvolvidos utilizando-se métodos supostamente baseados no Modelo Performativo. Escolhidos os projetos, partiu-se para identificar os arquitetos e engenheiros estruturais responsáveis pelo desenvolvimento dos

¹⁶ As discussões ocorreram durante o Estágio de Doutorado, na Technion University, em Israel.

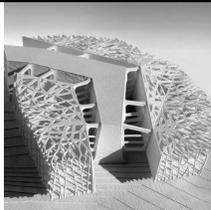
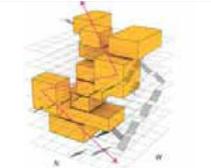
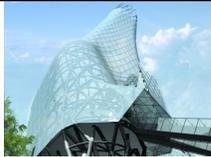
respectivos projetos. Esse processo resultou na catalogação de projetos de referência sintetizados no Quadro 5.1 e dos projetistas e escritórios relacionados no Quadro 5.2.

A terceira fase consistiu das seguintes partes: pesquisa sobre os projetos selecionados e sobre a produção de projetos dos escritórios selecionados; contato por e-mail com arquitetos e engenheiros dos escritórios selecionados, discussão e definição com as professoras Rivka Oxman e Regina Ruschel sobre nova lista de projetos e escritórios a serem estudados.

Durante o processo de seleção, terceira fase, definiu-se: estabelecer uma lista de escritórios a serem entrevistados (somente aqueles localizados na Europa, por questão de facilidade de acesso); escolher os estudos de caso apenas durante as entrevistas nos escritórios de projeto, com a identificação de projetistas daqueles projetos que melhor representavam o conceito do Modelo Performativo, dos projetos escolhidos, cujo escritório não se localizava na Europa; realizar o estudo de caso por meio do questionário enviado por e-mail e da revisão bibliográfica.

Com base na lista de projetos apresentados no Quadro 5.1, definiu-se em que escritório (se de arquitetura ou engenharia) se realizaria a entrevista (Quadro 5.3). A revisão bibliográfica da produção de projetos desses escritórios auxiliou no estabelecimento de conjecturas sobre a contribuição destes na utilização de métodos performativos de geração da forma. O Escritório Bollinger + Grohmann, por exemplo, foi citado em diversos trabalhos, pela sua produção inovadora, em cooperação com grandes nomes da arquitetura, utilizando ferramentas digitais na avaliação e geração da forma. Logo, a entrevista a esse escritório poderia fornecer pistas valiosas sobre práticas baseadas no modelo performativo.

Quadro 5.1 Lista inicial de projetos a serem estudados

Foto	Projeto		Foto	Projeto	
	1	Qatar Education City Convention		8	New Czech National Library
	Local	Doha		Local	Praga
	Arq.	Arata Isozaki		Arq.	Hensel / Menges
	Eng.	Mutsuro Sasaki		Eng.	B + G
	2	Island City Central Park Gringrin		9	People's Building
	Local	Fukuoka		Local	Xangai
	Arq.	Toyo Ito		Arq.	BIG
	Eng.	Mutsuro Sasaki		Eng.	PLOT, JDS, NKS, ARUP
	3	Swiss Re Building		10	VOxEL Extension
	Local	Londres		Local	Stuttgart
	Arq.	Forster + Partners		Arq.	LAVA
	Eng.	ARUP		Eng.	B + G
	4	Greater London Authority		11	Underground Station Roof, Piazza Garibaldi
	Local	Londres		Local	Nápoles
	Arq.	Forster + Partners		Arq.	Dominique Perrault
	Eng.	ARUP		Eng.	B + G
	5	Mèdiacité		12	Tour Phare, La Défense
	Local	Liège		Local	Paris
	Arq.	Ron Arad		Arq.	Morphosis, Thom Mayne
	Eng.	Buro Happold		Eng.	RFR
	6	Austrian Pavilion Expo 2010		13	Jalisco WEB University Library
	Local	Xangai		Local	Mexico
	Arq.	SPAN Architect		Arq.	NOX - Lars Spuybroek
	Eng.	ARUP		Eng.	Buro Happold
	7	Learning Centre, EPFL		14	AAMI Park Stadium
	Local	Lausanne		Local	Melbourne
	Arq.	SANAA		Arq.	Cox
	Eng.	B + G		Eng.	Arup

Nota: Essa lista contém o nome do projeto, a localização do projeto (cidade), o nome do escritório de arquitetura (Arq.) e o escritório de engenharia estrutural (Eng.)

Fonte: Autoria própria

Quadro 5.2 Lista inicial com o nome dos possíveis projetos e escritórios de arquitetura e de engenharia

Projeto		Escritórios de arquitetura		Escritórios de engenharia	
1	Qatar Education City Convention Centre	1	Arata Isozaki	1	Mutsuro Sasaki
2	The Island City Central Park Gringrin	2	Toyo Ito, Fukuoka	2	ARUP
3	Swiss Re Building	3	Forster and Partners	3	Buro Happold
4	Greater London Authority	4	Ron Arad Associates	4	Bollinger + Grohmann
5	Mèdiacité	5	SPAN Architect	5	RFR
6	Austrian Pavilion Expo 2010	6	SANAA		
7	Learning Centre, EPFL, Lausanne	7	Michael Hensel e Achim Menges		
8	New Czech National Library	8	BIG		
9	People's Building Shanguai	9	LAVA		
10	VOxEL Extension for the Hochschule für Technik	10	Dominique Perrault		
11	Underground Station Roof, Piazza Garibaldi, Napolis	11	Morphosis, Thom Mayne		
12	Tour Phare, La Défense, Paris	12	NOX - Lars Spuybroek		
13	Jalisco WEB University Library	13	COX		
14	AAMI Park Stadium				

Nota: para a seleção foram escolhidos projetos e escritórios (de arquitetura e de engenharia) que têm produzido edifícios relacionados pela literatura como baseados em Modelos Performativos

Fonte: Autoria própria

Com base no Quadro 5.3, foi possível estabelecer uma lista de quatorze projetos a serem estudados e treze escritórios a serem contatados. Dentre os escritórios registrados nesta lista, três deles, por se localizarem fora da Europa, foram desconsiderados para a fase de entrevista (Arata Isozaki, Mutsuro Sasaki e COX). Dos onze projetos restantes, dois deles (Austrian Pavilion Expo 2010 e People's Building Shanguai) foram retirados da lista, uma vez que as referências sobre eles apontavam para uma concepção que não contemplava uma prática seguindo o Modelo Performativo. Desse modo, restaram nove projetos, e foram enviados e-mails para os escritórios responsáveis por eles.

Depois de enviados os e-mails, descartaram-se três projetos - New Czech National Library, Mèdiacité, Jalisco WEB University Library. Os dois primeiros, porque não se teve resposta da equipe de arquitetura responsável pelos projetos além de se encontrarem poucas referências sobre eles. O terceiro projeto foi descartado porque, depois do contato por e-mail com o arquiteto responsável pelo projeto, viu-se que ele apresentava poucos elementos para ser classificado como Performativo.

Quadro 5.3 Lista de projetos e escritórios de projeto

	Estudos de casos	Escritórios	Nome
1	Qatar Education City Convention Centre	Arquitetura	Arata Isozaki
2	Island City Central Park Gringrin	Engenharia	Mutsuro Sasaki
3	Swiss Re Building	Arquitetura	Forster and Partners
4	Greater London Authority	Engenharia	ARUP
5	Mèdiacité	Arquitetura	Ron Arad Associates
6	Austrian Pavilion Expo 2010	Arquitetura	SPAN Architect
7	Learning Centre, EPFL	Engenharia	Bollinger + Grohmann
8	New Czech National Library	Arquitetura	Hensel + Menges
9	People's Building Shanguai	Arquitetura	BIG
10	VOxEL Extension	Arquitetura	LAVA
11	Underground Station Roof, Piazza Garibaldi, Napoli	Engenharia	Bollinger + Grohmann
12	Tour Phare, La Défense, Paris	Engenharia	RFR
13	Jalisco WEB University Library	Arquitetura	NOX (Lars Spuybroek)
14	AAMI Park Stadium	Arquitetura	COX

Fonte: Autoria própria

Por fim, nessa fase chegou-se a cinco escritórios a serem entrevistados, com seis estudos de caso (Quadro 5.4). Os escritórios de projeto selecionados são líderes na Europa em realização de grandes projetos de engenharia e arquitetura e têm demonstrado uma abordagem de projeto única em busca da realização de projetos baseados no desempenho. Visando aprofundar os estudos de caso, optou-se por escolher apenas cinco unidades-caso, uma para cada escritório entrevistado. Assim, seria possível aprofundar as discussões durante as entrevistas. Definiu-se também que a escolha das unidades-caso seria realizada apenas durante as entrevistas, após conversa com os projetistas e a escolha daqueles projetos que melhor representassem o conceito de projeto performativo.

Antes das visitas, nos e-mails enviados aos escritórios, explicaram-se os procedimentos, e solicitou-se que os projetistas escolhessem possíveis unidades-caso para serem discutidas. Apresentaram-se, aos projetistas, os projetos escolhidos nessa fase como indicação de possível estudo de caso, porém, coube aos projetistas dos escritórios a escolha daqueles estudos de caso que melhor representassem a prática de projeto baseada no desempenho.

Quadro 5.4 Lista resumida com os seis projetos e cinco escritórios a serem visitados

	Estudos de casos	Escritórios	Nome
1	Swiss Re Building	Arquitetura	Forster and Partners
2	Greater London Authority	Engenharia	ARUP
3	Learning Centre, EPFL	Engenharia	Bollinger + Grohmann
4	VOxEL Extension	Arquitetura	LAVA
5	Underground Station Roof, Piazza Garibaldi, Napoli	Engenharia	Bollinger + Grohmann
6	Tour Phare, La Défense, Paris	Engenharia	RFR

Fonte: Autoria própria

Após a realização das entrevistas e definição das cinco unidades-caso, voltou-se à lista do Quadro 5.1 e buscou-se identificar outras unidades-caso que fossem representativas do Modelo Performativo, mas cujos métodos não tivessem uma relação direta com os métodos utilizados nos cinco estudos de caso definidos nas entrevistas. O objetivo foi aumentar a variedade de casos típicos. Retomou-se, então, o estudo das três unidades cujas equipes de projeto localizavam-se fora da Europa (Qatar Education City Convention, The Island City Central Park Gringrin e AAMI Park Stadium). A primeira avaliação desses estudos de caso mostra que o projeto do Island City Park Gringrin utilizou o Método de Análise Sensitiva (*Sensitivity Analysis Method*) para geração da forma da casca, idealizado por Mutsuro Sasaki, e no projeto do Rolex Learning Centre (EPFL), também idealizado por Sasaki, utilizou-se um método para a concepção semelhante. Logo, poderia ser desconsiderado do estudo.

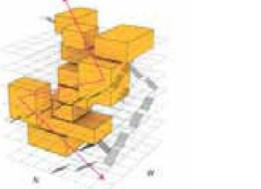
O projeto da cobertura do AAMI Park Stadium utilizou um processo de otimização parecido com o empregado no projeto do Primeiro Piso da Torre Eiffel. Por esses motivos, esses dois projetos foram descartados. Já o projeto da Sidra Trees do Qatar Education City Convention, representava um processo inovador e não contemplado nos demais estudos de caso. Logo, foi incorporado aos estudos de caso.

Definido o sexto estudo de caso, iniciou-se uma revisão bibliográfica mais profunda visando obter o máximo de informações sobre ele. Com base na revisão da literatura, foi possível ter um panorama aproximado do processo de geração da forma desse projeto. Por meio de uma exaustiva revisão bibliográfica, com destaque para o livro “Flux structure” (SASAKI, 2005), foi possível obter um panorama geral desse processo de projeto.

5.2.3 Identificação das unidades-caso

Após o processo de delimitação das unidades-caso, chegou-se a uma lista com seis estudos de caso de projetos digitais performativos (Quadro 5.5).

Quadro 5.5 Lista com a identificação e descrição dos estudos de caso

No.	Projeto	Localização	Descrição	Foto
1	Louvre Abu Dhabe	Abu Dhabe (Emirados Árabes)	Geração da forma do domo de 180 metros de diâmetro que cobre o Museu Louvre	
2	Extensão da Hochschule für Technik	Stuttgart (Alemanha)	Edifício de multi pavimentos para abrigar a nova Faculdade de Arquitetura de Stuttgart	
3	Smithsonian Courtyard Enclosure	Washington DC (Estados Unidos)	Cobertura do pátio central do Smithsonian Institution's Patent Office Building	
4	Rolex Learning Center (EPFL)	Lausanne (Suiça)	Piso e cobertura do ROLEX Learning Center	
5	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Paris (França)	Fachada de vidro de shopping localizado no Primeiro Piso da Torre Eiffel	
6	Qatar National Convention Center	Doha/ Qatar (Emirados Arabes)	Entrada principal do Qatar National Convention Centre	

Fonte: Autoria própria

Essas unidades-caso representam exemplos de projetos realizados nos últimos sete anos e desenvolvidos por escritórios de projeto líderes na Europa e Ásia. Esses escritórios têm projetado, nos anos recentes, obras emblemáticas de arquitetura e engenharia ao redor do mundo. No Quadro 5.6, apresenta-se a lista das cinco unidades-caso com indicação, em cada

uma delas, do nome do escritório onde se realizaram as entrevistas e o tipo do escritório, se de arquitetura ou engenharia.

Quadro 5.6 Perfil dos escritórios visitados nos estudos de caso

No.	Projeto	Tipo	Escritório
1	Louvre Abu Dhabi	ENGENHARIA	Buro Happold
2	Extensão da Hochschule für Technik	ARQUITETURA	Laboratory for Visionary Architecture (LAVA)
3	Smithsonian Courtyard Enclosure	ARQUITETURA	Foster + Partners
4	Rolex Learning Center (EPFL)	ENGENHARIA	Bollinger + Grohmann
5	Primeiro Piso da Torre Eiffel	ENGENHARIA	RFR

Fonte: Autoria própria

No Quadro 5.7 apresenta-se uma lista detalhada dos projetistas entrevistados, sua formação, a especialidade no escritório, a função e o nome.

Quadro 5.7 Entrevistados nos estudos de caso

Projeto Nº	Formação	Especialidade	Função	Nome Entrevistado
1	Engenheiro	Modelagem digital	Smart Group	Al Fisher
2	Arquiteto		Diretor	Tobias Walisser
3	Arquiteto	Modelagem digital	Diretor do Specialist Modelling Group	Xavier De Kestelier
4	Engenheiro		Equipe Projeto	Sascha Bohnenberger
			Equipe Projeto	Agnes Weilandt
5	Arquiteto/ Engenheiro		Equipe projeto	Nicolas Leduc

Fonte: Autoria própria

Os projetos estudados nos estudos de caso são exemplos recentes e representativos da produção contemporânea da arquitetura internacional. Mostram um amadurecimento do uso do meio digital como instrumento potencializador das qualidades do edifício. Dos seis estudos de caso, três deles já foram construídos, um está em construção (fev./2011), um está em fase de projeto e um deles não será construído (Quadro 5.8).

Quadro 5.8 Situação dos projetos estudados nos estudos de caso

Construído	Em Construção	Em Projeto	Não Construído
Smithsonian Courtyard Enclosure	Louvre Abu Dhabi	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Extensão da Hochschule für Technik
Rolex Learning Center (EPFL)			
Qatar National Convention Center			

Fonte: Autoria própria

5.2.4 Coleta de dados

A coleta de dados sobre as unidades-caso ocorreu mediante o uso dos seguintes procedimentos: entrevista (com aplicação de questionário) e revisão da literatura (unidades-caso/ escritórios).

5.2.4.1 Entrevistas

A entrevista com visita aos escritórios selecionados constituiu-se de três partes: visita às instalações dos escritórios para conhecer sua estrutura funcional e entrevista com aplicação de questionário.

O primeiro passo da visita consistiu na apresentação pelo entrevistador dos objetivos da visita e da pesquisa de doutorado. Em seguida, realizou-se uma visita às instalações dos escritórios com apresentação, por parte dos entrevistados, da estrutura de seu funcionamento, com apresentação de alguns dos trabalhos relevantes produzidos por eles. Após essa parte mais informal, iniciou-se a entrevista propriamente dita. Em cada entrevista, entregou-se ao entrevistado um roteiro com a estrutura da entrevista e um questionário para ser preenchido.

Os procedimentos utilizados em todas as entrevistas foram semelhantes e consistiram-se das seguintes partes: solicitação ao entrevistado para resumir os objetivos do escritório e sua estrutura operacional; aplicação de questionário; solicitação ao entrevistado para acrescentar uma fala, comentário ou abordar um aspecto do tema que não havia sido tratado na entrevista; solicitação ao entrevistado para proferir as considerações finais, os agradecimentos.

5.2.4.2 Questionário

O questionário continha três partes (Apendices A). Constituído por perguntas abertas discursivas, perguntas objetivas e perguntas mistas, totalizando 21 questões. A primeira parte do questionário visava compreender a prática diária do processo de projeto. A segunda parte era mais específica e tinha como objetivo compreender o processo de geração da forma de um edifício, que foi escolhido durante a entrevista. A terceira parte continha perguntas discursivas sobre as equipes de trabalho e o modo de colaboração.

5.2.4.3 Forma de Registro de Dados das Entrevistas

As formas de registro de dados das entrevistas foram:

- resposta gráfica registrada no questionário por meio de: marcar X nas perguntas de múltipla escolha; redação, esboços e croquis, de acordo com a solicitação da questão e com a necessidade do entrevistado em explicar algo;
- gravação de vídeo: para a gravação posicionou-se a câmara de modo que fosse possível gravar os movimentos e os riscos do entrevistado na folha, bem como suas expressões; as expressões deram valiosas pistas sobre algumas questões levantadas. Para todas as perguntas, subjetivas ou de múltipla escolha, pedia-se que o entrevistado justificasse suas respostas. Todas essas justificativas e comentários foram gravados, totalizando cerca de sete horas de entrevista.

5.2.4.4 Revisão Bibliográfica

Após a realização das entrevistas, iniciou-se uma revisão da literatura sobre as unidades-caso. As referências bibliográficas existentes são escassas e pouco abordam o processo de geração da forma, as técnicas e ferramentas utilizadas. As principais informações sobre o processo de geração da forma foram obtidas nas entrevistas. As informações adquiridas na revisão bibliográfica, em geral, eram informações genéricas sobre o edifício, fotos, desenhos e características da arquitetura. Os projetos já construídos, por exemplo, o Smithsonian Courtyard Enclosure já tem muitas informações publicadas, por outro lado, projetos recentes, ainda em

desenvolvimento, como o Primeiro Piso da Torre Eiffel, não tinham nenhum tipo de informação publicada.

5.3 Protocolos e Processos de Análises

Definidos os estudos de caso, criaram-se os protocolos para as análises. Os protocolos realizaram-se com base em uma série de categorias de análise. Essas categorias são características encontradas no processo de projeto, nas soluções arquitetônicas adotadas (produtos) e no perfil das equipes de projeto (escritórios). Entre as características, estão a forma inicial (quando se inicia o projeto digital), o nível de automação na geração da forma, as técnicas e ferramentas utilizadas.

Como o foco da investigação foi o uso de métodos baseados no Modelo Performativo, durante o processo digital de geração da forma, os protocolos de análises utilizados limitaram-se àqueles que pudessem contribuir com a análise desses métodos. As categorias de avaliação que poderiam auxiliar na investigação de outros métodos de projetos não performativos de geração da forma foram pouco consideradas, porque estavam fora do escopo da pesquisa. Como o enfoque principal foi na geração da forma usando o meio digital, a pesquisa concentrou-se na fase de concepção arquitetônica (Figura 5.2). Em alguns estudos de caso, abordaram-se outros estágios do processo de projeto, porém, foram abordagens superficiais. Ainda que se soubesse que outras fases do processo de projeto contribuíram para a geração da forma (fabricação, construção, operação, etc.), em virtude do modelo em questão se basear em práticas de projeto colaborativas, identificaram-se influências da fabricação e da construção na geração da forma.

Diante das informações obtidas nas categorias de análise, caracterizaram-se os métodos, as técnicas e ferramentas utilizadas nos processos de geração da forma baseadas no Modelo Performativo. As categorias de análise foram agrupadas nas seguintes partes: a equipe (escritório), o projeto (produto) e o processo de geração da forma (processo). As informações sobre o escritório de projeto visaram mostrar a dimensão, o sistema operacional e o perfil de colaboração com outros escritórios. As informações sobre o projeto visaram descrever sua natureza. As categorias de informações sobre o processo de geração da forma são as mais

importantes e estavam incluídas nessas: a geometria, as forças, as técnicas, os softwares, a interoperabilidade, a colaboração, os passos para a geração da forma, o nível de automação, etc.

Após os estudos de caso, fizeram-se análises comparativas a fim de classificar os métodos de projeto baseados nos Modelos Performativos. No processo de classificação dos métodos, utilizaram-se as categorias de componentes propostas para análise das unidades-caso. Essas categorias serviram para agrupar as classes de métodos de projeto desenvolvidos sob a égide desse modelo.

Figura 5.2 Fases do projeto abordadas nos estudos de caso



Nota: A concepção (em amarelo) foi o foco da pesquisa. Em alguns estudos de caso, outros estágios do processo de projeto (em verde) foram abordados superficialmente

Fonte: Autoria própria

O uso de categorias relacionadas com equipes, processo e produtos como protocolos de análises das unidades-caso foi o meio utilizado para compreender a natureza do Modelo de projeto digital Performativo. Esse procedimento viabilizou a classificação dos principais métodos de projeto performativos de maneira consistente e coerente. Essa classificação será apresentada no final deste capítulo.

5.3.1 Escritório

Embora o foco deste capítulo seja o estudo do processo de projeto digital baseado no Modelo Performativo, em cada estudo de caso, fez-se uma rápida abordagem sobre a estrutura dos escritórios de projeto que participaram das entrevistas. Essa abordagem visa apresentar o

perfil dos escritórios, em termos de porte, dimensão, tipo, estrutura e modo de colaboração com outros escritórios. Por meio desses perfis, pôde-se compreender um pouco melhor a estrutura dos ambientes em que os Modelos Performativos têm sido desenvolvidos e empregados na prática de projetos de arquitetura.

O Quadro 5.9 mostra os projetos avaliados nos estudos de caso e os escritórios responsáveis pela concepção da arquitetura e da estrutura. A opção outros desse quadro mostra escritórios que contribuíram com a idealização do método e o desenvolvimento do projeto estrutural. Em certas situações, diferentes escritórios de projeto com a mesma especialidade participaram no desenvolvimento de um único projeto, por apresentarem habilidades diferentes. No caso do Qatar National Convention Center, por exemplo, a concepção da estrutura se deu no escritório SAPS/ Sasaki Partners e seu desenvolvimento e viabilização no Buro Happold. Em projetos de maior complexidade de resolução, exigiu-se a participação de projetistas, construtores, fabricantes de diferentes nacionalidades. O Quadro também mostra que alguns escritórios, como o Buro Happold, Bollinger + Grohmann e o SAPS/ Sasaki Partners, estiveram envolvidos em mais de um dos projetos estudados. Isso indica que são escritórios que vêm consolidando-se na prática de Projeto Performativo.

Quadro 5.9 Perfil dos escritórios envolvidos na concepção dos projetos dos estudos de caso

No.	Projeto	Concepção Arquitetura	Concepção Estrutura	Outros
1	Louvre Abu Dhabe	Jean Nouvel	Buro Happold	
2	Extensão da Hochschule für Technik	Laboratory for Visionary Architecture (LAVA)	Bollinger + Grohmann	
3	Smithsonian Courtyard Enclosure	Foster + Partners	Buro Happold	
4	Rolex Learning Center (EPFL)	SANAA (Kazuyo Sejima + Ryue Nishizawa)	Bollinger + Grohmann	Idealização método: SAPS/ Sasaki Partners
5	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Moatti & Rivière	RFR (Peter Rice)	
6	Qatar National Convention Center	Arata Isozaki	SAPS/ Sasaki Partners	Desenvolvimento estrutura: Buro Happold

Fonte: Autoria própria

Para melhor entender o perfil dos escritórios estudados, no Quadro 5.10, mostram-se os escritórios envolvidos na concepção dos projetos dos estudos de caso indicando: porte, filial,

extensão, atuação e especialidade. O porte nesse quadro indica o número de funcionários dos escritórios. Definiram-se dois tipos de porte: para escritórios com mais de 50 funcionários (G); para escritórios com até 50 funcionários (P). A filial indica se o escritório tem ou não filial/filiais: tem (S); não tem (N). A extensão indica, para os escritórios que têm filiais, sua localização: internacional (I); só no país de origem (N). A atuação indica o país onde se realizam os projetos: em várias nacionalidades (I); apenas em um país (N). A especialidade indica se os escritórios têm seu quadro de funcionários especializados essencialmente em um tipo de conhecimento: engenharia (E); arquitetura (A); multidisciplinar arquitetura (MA); multidisciplinar engenharia (ME).

Quadro 5.10 Perfil dos escritórios estudados

Perfil	Escritórios De Projeto									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Buro Happold	LAVA	Foster + Partners	Bollinger + Grohmann	RFR	SAPS	Jean Nouvel	SANAA	Moatti & Rivière	Arata Isozaki
PORTE	G	P	G	G	G	P	G	G	P	G
FILIAL	S	S	S	S	S	N	N	S	N	N
EXTENSÃO	I	I	I	I	I			N		
ATUAÇÃO	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
ESPECIALIDADE	ME	A	MA	ME	ME	E	A	A	A	A

Fonte: Autoria própria

Observa-se, no Quadro 5.10, que todos os escritórios descritos têm experiência internacional embora nem sempre sejam escritórios de grande porte. As filiais localizam-se fora do país de origem. Em termos de especialidade, com exceção do escritório Foster + Partners, os demais que têm equipes multidisciplinares são escritórios de engenharia. No escritório RFR, por exemplo, existem vários funcionários com titulação de arquiteto e engenheiro. Nesse último também existem muitos arquitetos que trabalham na função de coordenador entre o escritório de arquitetura e o de engenharia.

5.3.2 Perfil do projeto

Antes de aprofundar os estudos no processo de projeto, foi importante descrever o perfil dos projetos estudados. Embora a caracterização da arquitetura, como produto, não seja o objetivo deste capítulo, é importante entender a arquitetura. Nesse item analisaram-se as informações gerais sobre a arquitetura dos edifícios: diretrizes dos partidos arquitetônicos adotados, complexidade da forma, qualidade do espaço e programa arquitetônico.

5.3.3 A geração da forma

Nesta seção apresentam-se as principais categorias de informação relacionadas com o processo de geração da forma. Por meio dessas categorias, avaliaram-se e classificaram-se diferentes métodos de projeto que usam o Modelo Performativo. Por motivos didáticos, essas categorias de componentes classificaram-se nos seguintes domínios: geometria e forças; técnicas e ferramentas; interoperabilidade e colaboração; geração da forma e nível de automação.

5.3.3.1 Geometria e Forças

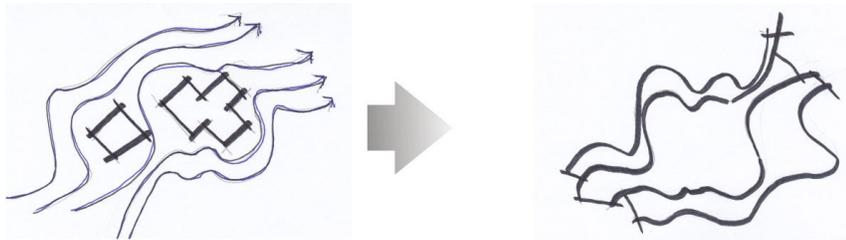
O domínio da geometria e das forças liga-se àquelas categorias relacionadas com a síntese da forma. Nesse grupo incluem categorias relacionadas com a emergência da forma digital e das forças usadas na geração da forma.

Geometria

A categoria relacionada com a emergência da forma digital visa identificar em que estágio de desenvolvimento da forma o Modelo Performativo passou a atuar gerando ou transformando a forma. O ponto de partida foi identificar a forma inicial, a qual, neste trabalho, se define como aquela que ainda não foi alterada em virtude de influências do meio digital. A forma pode até ter sido representada em um ambiente computacional, todavia, apenas como meio de representação de uma ideia predefinida na mente dos projetistas. As formas iniciais se classificaram em:

1. Princípio - quando não existe ainda uma geometria definida, mas apenas alguns princípios que vão guiar a geração da forma (Quadro 5.3).
2. Geometria básica - uma geometria básica (pode ser bi ou tridimensional) é usada como ponto de partida para a geração da forma. Mecanismos (algoritmos) são aplicados à forma resultando numa nova geometria (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).
3. Partido - nesse caso os princípios gerais da geometria já foram definidos, porém a forma ainda está num processo de evolução. Transformações geométricas permanecem sendo feitas na forma (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

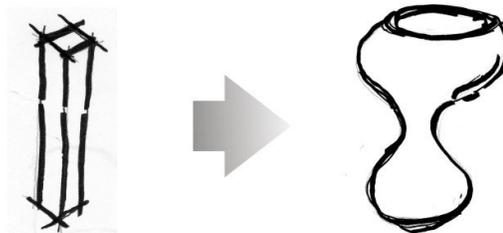
Figura 5.3 Exemplo de princípio é a geração de uma forma que é resultado da materialização da corrente de ar quando desvia-se de um objeto



Nota: Nesse caso não existia uma geometria prévia, e sim um princípio que deve ser obedecido; com base nesse princípio, a forma é materializada

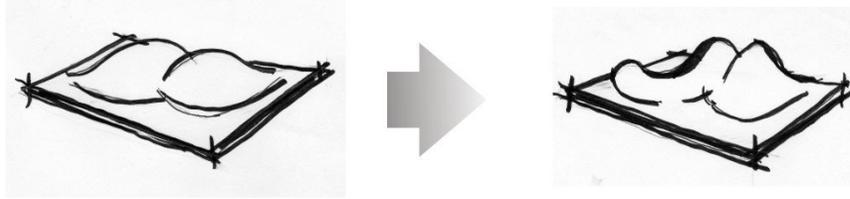
Fonte: Autoria própria

Figura 5.4 Um exemplo de geometria básica é quando num prisma de base quadrada são aplicadas regras se transformando num volume com forma geométrica bem diferente da geometria inicial



Fonte: Autoria própria

Figura 5.5 Um exemplo de partido é quando uma forma geométrica passa por alterações visando melhorar o desempenho da sua geometria



Fonte: Autoria própria

No processo de geração da forma, podem-se empregar formas geométricas estruturais simples ou formas complexas. As estruturas definidas por formas geométricas simples constituem-se, em geral, por geometrias de matemáticas básicas. Essas são definidas por cilindro, prisma, esfera, calota esférica, torus, etc. De maneira simplificada, as formas complexas podem ser derivadas, de acordo com Mangelsdorf (2010), em quatro diferentes categorias de geração de formas: geometria matemática simples, encontrar a forma, forma livre, abordagem híbrida. No processo de geração da forma, então, podem-se trabalhar com cinco principais categorias geométricas usadas na geração da forma:

- Geometria de Matemática Básica – consiste em uma geometria simplificada composta por um universo limitado de tipos de formas. São formas geométricas geralmente puras e fáceis de avaliar (Figura 5.6).
- Geometria Matemática Simples – geometrias complexas baseadas em geometrias de matemáticas básicas (Figura 5.7), conforme Mangelsdorf (2010).
- Encontrar a Forma – refere-se a encontrar a superfície mínima em termos de eficiência estrutural de um projeto. São estruturas concebidas com base em restrições físicas (Figura 5.8), segundo Mangelsdorf (2010). Uma variação nesse método proposto por Sasaki (2005) é o uso da Otimização de Pareto.
- Forma Livre – são formas desenvolvidas independentemente de restrições físicas ou limitações (MANGELSDORF, 2010) – Figura 5.9.
- Abordagem Híbrida – na opinião de Mangelsdorf (2010), soluções que trazem abordagens de todos os três outros métodos de formas complexas (Figura 5.10). Para

esta pesquisa, também será considerada como híbrida as soluções que utilizem pelo menos duas das demais categorias geométricas descritas acima.

Figura 5.6 Exemplo de geometria concebida como Geometria de Matemática Básica



Nota: Geodésica do Montreal Biosphère, Pavilhão dos EUA para a Expo 67 em Montreal. Projeto de Buckminster Fuller

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Biosphere_montreal.JPG>

Figura 5.7 Exemplo de geometria concebida como Geometria Matemática Simples



Nota: Cobertura do Milan E3 Exhibition Centre em Milão (Itália), Grimshaw (arq.), Buro Happold (eng.), 2006

Fonte: Oxman; Oxman (2010, p. 40)

Figura 5.8 Exemplo de geometria concebida como Encontrar a Forma



Nota: Cobertura do Khan Shatyr Entertainment Center, Astana (Kasakistão) Foster + Partners (arq.), Buro Happold (eng.), 2010

Fonte: <http://www.solaripedia.com/13/325/3772/khan_shatyr_centre_central_pole.html>

Figura 5.9 Exemplo de geometria concebida como Forma Livre



Nota: Cobertura do Glasgow Museum of Transport, Glasgow (Escócia), Zaha Hadid (arq.), Buro Happold (eng.), 2011

Fonte: Oxman, Oxman (2010, p. 44)

Figura 5.10 Um exemplo de geometria concebida como Abordagem Híbrida



Nota: Cobertura da circulação do Médiacité Liège, Liège (Belgica), Ron Arad (arq.), Buro Happold (eng.)

Fonte: <<http://global.designdb.com/disko/read.asp?boardseqnum=11529>>

Forças

No processo de geração da forma baseada no Modelo Performativo, critérios de desempenho vão dirigir a otimização ou geração da forma. Esses critérios de desempenho são forças que agem na forma impulsionando sua otimização ou geração. Essas forças podem ser quantificáveis ou não quantificáveis. As primeiras podem ser computadas como dados numéricos num sistema computacional. As não quantificáveis são mais complexas, necessitam ser transformadas em regras e parâmetros de projeto.

Uma ou mais forças podem ser usadas na geração da forma. Quando se utilizam várias forças, em geral, estabelecem-se hierarquias de importância. O Quadro 5.11 mostra forças quantificáveis e não quantificáveis usadas no processo de projeto.

Quadro 5.11 Principais forças quantificáveis e não quantificáveis usadas em projeto

Forças quantificáveis		Forças não quantificáveis	
Carga estrutural	Térmica	Perspectiva do espaço	Movimento
Acústica	Ventilação	Restrições do lugar	Fabricação
Otimização energética	Lumínica	Programa arquitetônico	Construtibilidade
Custo	Durabilidade	Estética	

Fonte: Autoria própria

Para simplificação, algumas forças que apresentavam características relacionadas foram suprimidas e associadas a certas categorias. Forças, como a pressão do vento, foram consideradas como força interna à carga estrutural. Forças, como o movimento de pessoas e restrições do lugar, foram consideradas como características do programa arquitetônico.

5.3.3.2 Técnicas e Ferramentas

Nesta seção descrevem-se e se caracterizam as categorias relacionadas com técnicas e ferramentas computacionais utilizadas durante o processo de geração da forma. Técnica (*technique*), neste trabalho, entende-se como procedimento sistemático pelo qual uma tarefa complexa ou científica é realizada (FARLEX, 2010). Emprega-se durante o processo de projeto na execução de diferentes tarefas de projeto. Ferramentas (*tool*) são meios utilizados na execução de uma operação (FARLEX, 2010). As principais ferramentas utilizadas no projeto digital são softwares computacionais, que podem ser utilizados para execução de uma operação, ocorrendo nos estágios de síntese, avaliação, otimização e na representação.

Técnicas

Para cada método de projeto estudado, identificaram-se as técnicas utilizadas, o estágio da sequência de decisões (geração, avaliação, otimização/desempenho e representação) em que as técnicas foram utilizadas e algumas características relacionadas com seu uso.

No estágio de geração, as técnicas utilizadas foram basicamente de dois tipos: paramétricas e algorítmicas. As técnicas paramétricas são aquelas que fornecem descrições dos parâmetros de projeto por meio de parâmetros e relações que permitem variações. As técnicas algorítmicas são aquelas que descrevem o projeto por meio de um conjunto de regras e algoritmos (ALFARIS; MERELLO, 2008).

No estágio de avaliação e simulação, dois tipos de técnicas se destacam: as de baixa ordem (*low order*) – baixa fidelidade (*low fidelity*) – e as de alta ordem (*high order*) – alta fidelidade (*high fidelity*). As técnicas de baixa ordem são principalmente modelos heurísticos e empíricos que derivam da observação e aproximação de dados apropriados em vez de serem baseadas na física e nas equações do primeiro princípio. As técnicas de alta ordem são modelos teóricos baseadas na física e derivadas do uso de equações do primeiro princípio (ALFARIS; MERELLO, 2008).

No estágio de otimização/desempenho, dois tipos de técnicas são comumente utilizadas: técnicas de otimização numéricas e técnicas heurísticas, baseadas em algoritmos. As técnicas de otimização numéricas incluem técnicas que lidam com problemas com restrições e problemas sem restrições. As técnicas heurísticas são geralmente técnicas não gradientes, ou seja, não precisam de nenhum gradiente de objetivo de função para alcançar o estágio ótimo (ALFARIS; MERELLO, 2008).

Algumas técnicas são utilizadas em mais de um estágio do ciclo de decisão.

Ferramentas

As ferramentas tratadas aqui são softwares utilizados no processo de geração da forma. Buscou-se identificar e caracterizar nos estudos de caso o perfil desses softwares. Identificaram-se os softwares utilizados; o estágio do ciclo de decisão em que estes foram utilizados (na geração, avaliação, otimização/desempenho ou na representação); o tipo de desenvolvimento do software; as habilidades requeridas. O tipo de desenvolvimento e as habilidades requeridas

visam identificar o perfil da competência que os projetistas necessitam ter para se trabalhar com os softwares utilizados na geração da forma. Os tipos de desenvolvimento de softwares são: softwares disponíveis comercialmente; softwares disponíveis comercialmente, porém customizados pelos usuários; softwares desenvolvidos pelos escritórios para serem utilizados em diferentes projetos; softwares desenvolvidos pelos escritórios para serem utilizados em apenas um projeto.

Associado ao tipo de software, buscou-se identificar o conhecimento requerido para seu uso: conhecimento básico (quando qualquer projetista pode manusear a ferramenta facilmente); conhecimento avançado (quando é necessário o desenvolvimento de habilidades específicas para o manuseio do software); desenvolvimento de capacidade avançada em script (quando o usuário necessita ter habilidades avançadas em programação computacional). Essas informações foram coletadas para cada software utilizado no processo de geração da forma.

5.3.3.3 Interoperabilidade e Colaboração

Nesta seção buscou-se identificar o perfil da interoperabilidade e da colaboração utilizado no processo de geração da forma. Na questão da interoperabilidade, buscou-se identificar como se dava o fluxo de informações entre diferentes programas computacionais. Para isso, inicialmente questionou-se sobre o nível de interoperabilidade, as limitações e os mecanismos usados para reduzir as deficiências de interoperabilidade entre as ferramentas computacionais, utilizadas dentro do escritório, e entre os escritórios de projeto. Também se identificaram os formatos de troca de arquivos mais utilizados durante o processo de geração da forma e o perfil das ligações entre os softwares.

Para compreender melhor o nível de colaboração interna no escritório e entre as equipes de projeto, identificaram-se o perfil da qualificação dos funcionários dos escritórios, os principais agentes internos e externos e como esses colaboraram durante o processo de geração da forma. Durante as entrevistas, solicitou-se que fosse feito um esboço que sintetizasse a colaboração.

5.3.3.4 Geração da Forma

Com a identificação da geometria e das formas empregadas, da compreensão das técnicas, das ferramentas e entendendo melhor a colaboração e interoperabilidade, descreveram-se os processos de geração das formas e os ciclos. Identificou-se o ponto inicial no processo de geração da forma em que foi utilizado o meio digital. Descreveram-se os principais passos do processo de projeto, a sequência das técnicas utilizadas, como os softwares interagem com eles próprios e com os projetistas, as principais atividades e tarefas realizadas. Para sintetizar, apresentou-se um modelo esquemático do processo de geração da forma.

5.3.3.5 Modelo Digital e Nível de Automação

Baseado em uma estrutura conceitual de modelo de projeto digital proposto por Oxman (2006), procurou-se identificar que representação simbólica melhor expressava a relação entre os projetistas e os componentes do projeto digital. O tipo de relação entre projetista e componentes do projeto digital indicava um perfil de automação digital durante os ciclos de decisão. O nível de automação poderia ser: automatizado (quando todos os estágios da sequência de decisão são automatizados); semiautomatizados (quando alguns estágios da sequência de decisão são manuais e outros automatizados); manuais quando todos os estágios da sequência de decisões são manuais. Nesse caso, o projetista implementa e age intermediando as informações em todos os estágios do ciclo de decisão.

5.4 Estudos de Caso

Nesta seção analisam-se os estudos de caso à luz dos protocolos definidos pelas categorias de análises. Os estudos de caso foram apresentados seguindo a seguinte sequência: Museu Louvre Abu Dhabi; Extensão do *Hochschule für Technik*; Smithsonian Institution Courtyard Enclosure; Rolex Learning Center; Primeiro Piso da Torre Eiffel; Qatar Education City Convention.

5.4.1 ESTUDO DE CASO 1: Museu Louvre Abu Dhabi

5.4.1.1 Escritório: Buro Happold

O escritório de engenharia Buro Happold é um dos mais conceituados da Europa. Tem uma jornada de mais de trinta anos de experiência em grandes e complexos projetos em parceria com alguns dos mais renomados arquitetos contemporâneos. Além da sede, em Bath (Reino Unido), conta com filiais em mais de 26 cidades em diferentes partes do mundo. Busca, em parceria com arquitetos, a excelência em projeto (MANIBO, 2008). Atua em três principais áreas: edifício, infraestrutura e ambiental. Na área do edifício, atua em quatro campos de conhecimento que estão inter-relacionados: engenharia estrutural, serviços de construção, infraestrutura e consultoria especializada.

Apoiado em um grupo multidisciplinar, distribuído em diversas áreas, o escritório Buro Happold usa o conhecimento de vários especialistas, colaborativamente com arquitetos e clientes, na busca de projetos que atendam critérios de eficiência e racionalidade para a construção e para o ciclo de vida do edifício. Para alcançar esses objetivos, utiliza ferramentas computacionais sofisticadas para teste de construtibilidade e de desempenho do edifício, antes de sua construção (BURO HAPPOLD, 2011a).

Entre as equipes que compõem o escritório, o SMART Solution Group atua em serviços especializados baseados em inovação computacional trabalhando diretamente com concepção e geração da forma em parceria com arquitetos. Esse grupo desenvolve soluções simples e inovadoras para complexos problemas de engenharia e novas tecnologias para melhorar a eficiência na entrega de soluções para o ambiente construído (BURO HAPPOLD, 2011a).

A equipe do SMART Solution é composta por engenheiros, matemáticos e consultores que ajudam os clientes a resolverem uma variedade de novos, desafiantes e complexos problemas envolvendo análises computacionais avançadas. Para isso, conta com forte carga de pesquisa e profissionais com habilidades computacionais, segundo o engenheiro Al Fisher (informação verbal).¹⁷

¹⁷ Entrevista concedida por Al Fisher, Engenheiro da equipe do SMART Solution, Buro Happold em Bath, 17 de fevereiro de 2011.

Nas áreas de otimização e geração da forma a equipe do SMART Structural Solutions tem desenvolvido uma série de ferramentas especializadas, por exemplo, *Tensyl* (encontrar a forma utilizando equações não lineares), *SMART Form* (malha estrutural e otimização topológica), *SMART Sizer* (otimização do tamanho das membranas), *Multi-objective optimization* (para o desempenho estrutural, conforto ambiental e custo) e *SMART Move* (para otimização de redes espaciais e espaços de circulação). Por meio de técnicas e ferramentas computacionais, o SMART Solution tem tido um papel decisivo na geração da forma arquitetônica.

5.4.1.2 Projeto: Museu Louvre Abu Dhabi

Informações técnicas do projeto

Para compreender melhor o estudo de caso, o Quadro 5.12 apresenta a ficha técnica do projeto, com informações como o nome, a localização, o ano de realização do projeto, dimensões e a autoria. Essas informações permitem entender melhor a natureza do projeto, bem como seu porte e dimensão.

Quadro 5.12 Informações técnicas do Museu Louvre Abu Dhabi

<i>Informação</i>	<i>Descrição</i>
Nome do projeto	Museu Louvre Abu Dhabi (MLAD)
Localização	Abu Dhabi, Saadiyat Island
Características	Filial do Museu Louvre
Área total	24.000 m ²
Área de coleção permanente	6.000 m ²
Área de exposição temporária	2.000 m ²
Diâmetro da cúpula	180 m
Ano do projeto	2007/2012
Status do projeto	Em construção
Cliente	The Tourist Development and Investment Company of Abu Dhabi
Arquiteto	Jean Nouvel
Engenheiro estrutural	Buro Happold

Fonte: Autoria própria

Descrição do edifício

Como parte de um plano de desenvolvimento de uma região (com um prazo de implantação estimado em trinta anos), o Distrito Cultural Saadiyat Island (em Abu Dhabi) foi

idealizado para abrigar a maior classe de bens culturais da humanidade (MANIBO, 2008). Entre os projetos que estão sendo construídos nesse distrito, destacam-se uma série de edifícios icônicos como o Museu do Louvre Abu Dhabi (Figura 5.11a), o Museu Nacional Sheikh Zayed (Arq. Foster + Partners); o Guggenheim Abu Dhabi (Arq. Frank Gehry); o centro de artes performativas (Arq. Zaha Hadid); o Museu Marítimo (Arq. Tadao Ando).

Figura 5.11 Imagens do Museu do Louvre Abu Dhabi



a) Nota: a) Localização no Distrito Cultural Saadiyat Island; b) vista área da maquete do museu com destaque para a cúpula; c) Perspectiva externa

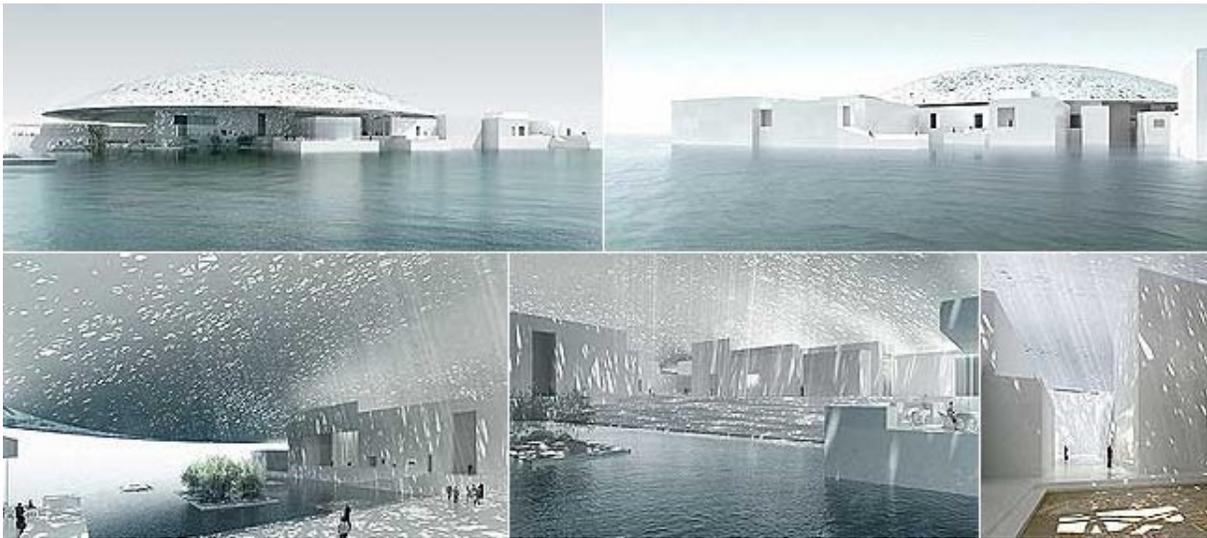
Fonte: <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions/>>

O MLAD, segundo as palavras de Jean Nouvel (NAFAS, 2007, tradução livre), foi concebido como “[...] um grande domo, uma forma comum para a toda a civilização”. O domo, que é o elemento principal do projeto, constitui-se por “[...] uma malha de diferentes padrões entrelaçadas em um teto translúcido, levando a uma luz difusa, mágica, que entra no espaço como parte da tradição da arquitetura árabe”.¹⁸ Pela sua dimensão e localização, o domo parece que flutua na água (Figura 5.11b).

O projeto do MLAD tem sua inspiração no desenho das cidades árabes tradicionais. Sobre uma estrutura de construções aglomeradas, onde estão localizados os principais blocos do museu, destaca-se uma cúpula de 180 metros de diâmetro (o Domo, Figura 5.11b, c) apoiada em quatro pilares localizados em seu perímetro. Essa cúpula foi concebida como uma malha que filtra a luz solar incidente no interior da construção, criando áreas de sombra no seu interior (Figura 5.12), o que permite a existência de espaços com uma temperatura ambiente agradável, que serão utilizadas para exposições de arte externas (BURO HAPPOLD, 2011a).

¹⁸ No original: “[...] a large dome, a form common to all civilizations. [...] “a web of different patterns interlaced into a translucent ceiling, the dome lets a diffuse magical light enter the space in the tradition of great Arabian architecture.”

Figura 5.12 Vistas externas e internas do Museu do Louvre Abu Dhabi



Fonte: <<http://www.roplo.com/catalog.asp?page=11>>.

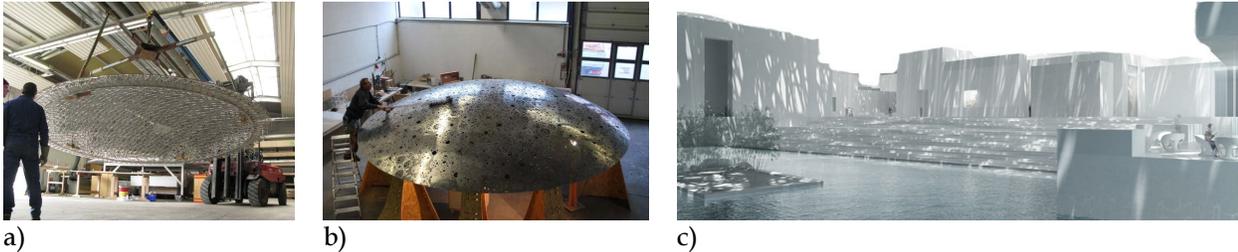
O projeto foi concebido sob a base de dois sistemas arquitetônicos, independentes e articulados: a cúpula (Figura 5.13a, b) e os volumes prismáticos (Figura 5.13c). O primeiro usou um processo de projeto baseada no Modelo Performativo, o segundo um Modelo CAD para Avaliação. A cúpula, que é o coração do edifício e se destaca na paisagem como elemento simbólico, funciona como uma simbiose da tradição árabe com a cultura ocidental. Os volumes prismáticos definem os espaços internos. Esses se constituem de uma série de galerias, formando zonas que abrigam obras de arte de diferentes períodos e regiões geográficas, enfatizam o diálogo entre várias civilizações nos campos das artes (NAFAS, 2007).

Nos volumes prismáticos do museu, também estão inclusos um auditório, um centro pedagógico, áreas para pesquisa, áreas educacionais para adultos e crianças, setor para conservação e restauro, café e restaurante (NAFAS, 2007). A maior parte desses setores se localizará em ambientes internos com condições climáticas estritamente controladas.

Para garantir o conforto do edifício, projetou-se uma variedade de sistemas de energia passiva, incluindo o uso da refrigeração natural para os edifícios e a otimização do uso da água. O edifício também foi concebido para resistir a condições climáticas extremas da região com muita poeira, areia, alta salinidade, umidade e ocasionalmente tempestade de areia. Apesar de toda a complexidade ambiental, o projeto atende às exigências do U.S. Green Building Council's

LEED (*Leadership in Energy and Environment Design*), em termos de conservação dos recursos naturais (BURO HAPPOLD, 2011a).

Figura 5.13 Imagens dos dois sistemas arquitetônicos



a) b) c)
Nota: a, b) imagens da maquete da cúpula; c) imagem interna sem a cúpula

Fonte: a, b <<http://1-to-one.com/project-louvre-abu-dhabi>>; c <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions/>>

5.4.1.3 Processo de Projeto: geometria e forças

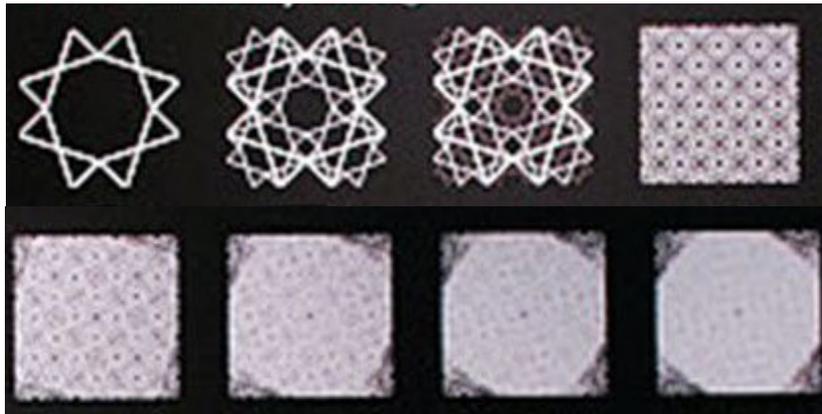
Este estudo de caso consiste no projeto da cúpula do Museu Louvre Abu Dhabi, que compreende a calota esférica de 180 metros de diâmetro.

Geometria

Quando técnicas digitais de geração da forma foram utilizadas no processo de projeto, os princípios geométricos da forma inicial ainda eram conceitos em um estágio prematuro, não claramente definido. Estava apoiado na ideia de uma geometria básica (calota esférica). O conceito da cobertura era de um *pattern* que deveria ser concebido sob a superfície da cúpula. O ponto de partida foram esboços de combinações geométricas propostas pelo escritório de Jean Nouvel (Figura 5.14).

A complexidade da geometria foi resultado da combinação de uma calota esférica com um complexo jogo de luz e sombra que passa e é filtrado nas diversas camadas da estrutura da cobertura (GEOMETRIA x LUZ/SOMBRA). O que se esperava dessa forma era que fosse criado um ambiente interno complexo definido por áreas com diferentes intensidades de luz, caracterizando-se em jogos difusos de luz e sombra. Além disso, buscava-se um ambiente interno com temperatura agradável de modo que fosse possível a realização de exposições externas, localizadas embaixo da cúpula.

Figura 5.14 Geometria da tecelagem proposta por Jean Nouvel

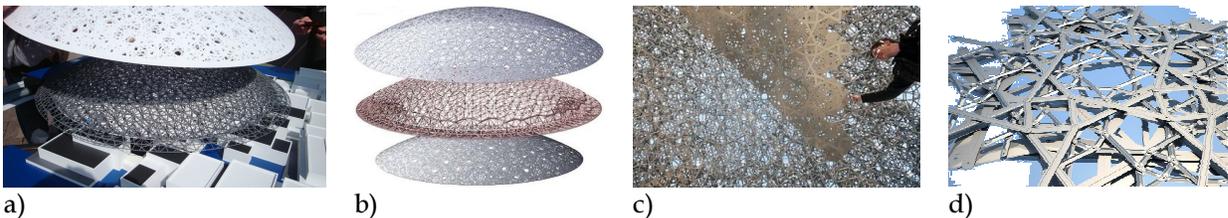


Fonte: <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions/>>

Do ponto de vista do princípio das categorias geométricas empregadas, a geração da forma foi concebida sob três níveis:

- Geometria de matemática básica – a forma do domo, calota esférica (Figura 5.15a).
- Geometria de matemática simples – o padrão definido de tecelagem (Figura 5.15b).
- Forma livre – o tamanho e porosidade dos padrões foram criados com base em critérios geométricos visando um desempenho lumínico e térmico, não seguiu restrições geométricas predefinidas. Baseou-se em uma forma livre (Figura 5.15c, d).

Figura 5.15 Composição da estrutura da cúpula



Nota: a) domo e corpo do edifício; b) camadas cobertura; c) vista inferior da maquete do domo; d) Tamanho e porosidade da estrutura definida por princípio da forma livre

Fonte: a, d <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions/>>; b, c <<http://1-to-one.com/project-louvre-abu-dhabi>>

O Quadro 5.13 sintetiza as características geométricas do processo de geração da forma da Cúpula do MLAD. O processo digital teve como forma inicial uma geometria básica. Pela sua complexidade, empregou-se um modelo híbrido de geometria composto por: geometria de matemática básica, geometria de matemática simples e forma livre.

Quadro 5.13 Características da geometria da cúpula

Projeto	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
Cúpula do Louvre Abu Dhabe	Geometria básica	Híbrida (geometria matemática básica + geometria matemática simples + forma livre)

Fonte: Autoria própria

Forças

Ao longo do processo de projeto diversas forças (desempenhos) foram usadas de modo a guiar o processo de geração da forma. Estas foram: carga estrutural, luz natural e térmica. As duas últimas forças trabalhavam uma em oposição à outra. Quando se aumentava a incidência da luz precisava-se trabalhar meios de reduzir a carga térmica. A carga estrutural era outro fator extremamente importante. Quando foi gerada a geometria básica ficou definido que a cúpula seria apoiada em 5 colunas. Durante a geração da forma reduziu-se para 4 colunas. O Quadro 5.14 sintetiza as principais forças.

Quadro 5.14 Forças-guia no processo de geração da forma da cúpula

Projeto	Forças		
Cúpula do Louvre Abu Dhabe	Carga estrutural	Luz natural	Térmica

Fonte: Autoria própria

5.4.1.4 Processo de Projeto: técnicas e softwares

Técnicas

No Quadro 5.15, descreveram-se as principais técnicas utilizadas. Essas foram utilizadas em diversas sequências de decisão e em estágios diferentes de uma mesma sequência de decisões. Nesse quadro também se indicam os estágios da sequência de decisão em que as técnicas eram utilizadas e em que outros estágios as técnicas estavam sequenciadas.

Quadro 5.15 Técnicas utilizadas na geração da forma da cúpula

Técnica	Estágio ciclo decisão	Loop iterativo com
Modelagem Paramétrica	Geração, Representação	Representação
Algoritmo Genético	Geração, Otimização/Desempenho	Representação, avaliação
Método de Elemento Finito	Avaliação	Otimização/Desempenho
Dinâmica de Fluidos Computacionais		
Algoritmo de Otimização Estrutural	Otimização/Desempenho	Geração
Prototipagem	Representação	Avaliação
Scripting	Geração, Otimização/Desempenho, Avaliação	Geração, Otimização/Desempenho, Avaliação, Representação

Fonte: Autoria própria

Durante o processo de geração da forma, criou-se um modelo digital utilizando um software de modelagem paramétrica. Esse modelo, de grandes proporções, permitiu gerar diversas versões da cúpula, que eram geradas e alteradas por meio de um processo de otimização, baseado em critérios de desempenho estrutural e ambiental. Uma técnica muito utilizada para a representação do modelo foi a prototipagem. Essa técnica teve um papel importante na parte intuitiva do processo de projeto, porque permitiu que os arquitetos estudassem o jogo de luz e sombra resultado da estrutura da cobertura (Quadro 5.15). Por meio de avaliação intuitiva sobre os efeitos da luz, os arquitetos solicitavam alteração nos requisitos de projeto.

Figura 5.16 Arquiteto Jean Nouvel estudando a incidência da luz por meio de Mock Up na escala 1/1



a)



b)

Fonte: <<http://www.burohappold.com>>

Software

Os critérios usados para a escolha do software variaram durante os estágios conceituais e de desenvolvimento do projeto. No estágio conceitual, foi necessário um alto nível de flexibilidade e que todos os projetistas trabalhassem em um único modelo. Na etapa de detalhamento, foi fundamental uma completa coordenação entre as várias disciplinas.

O Quadro 5.16 apresenta os softwares utilizados no desenvolvimento do projeto, os estágios do ciclo de decisão em que cada um dos softwares foram utilizados, o tipo de solução (autoria do software) e as habilidades requeridas para o uso do software.

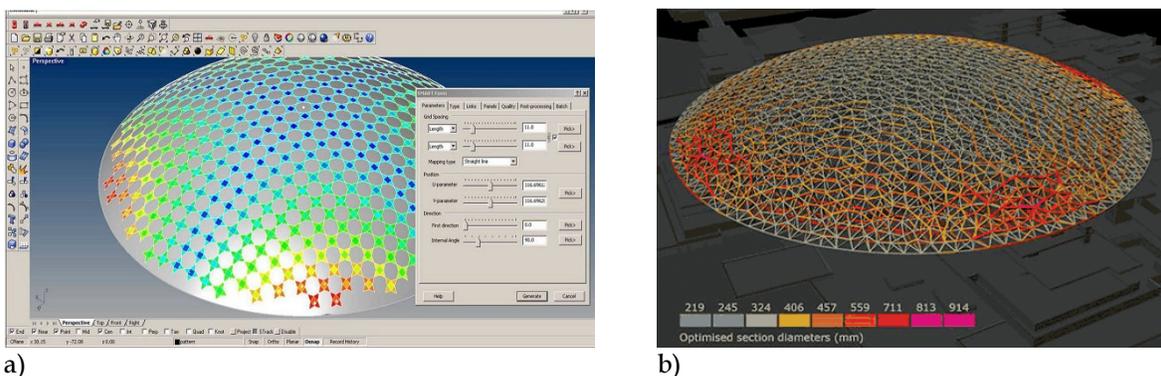
Quadro 5.16 Software utilizados na fase de concepção da forma da cúpula

Software	Estágio do ciclo de decisão	Tipo de solução	Habilidades para uso
Rhino 3D (+ grasshopper + programa)	Geração da forma	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
	Representação		
Digital Projects	Geração da forma	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
	Representação		
Ansys	Avaliação, otimização	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
SMART Sizer	Avaliação, otimização	Desenvolvido pelo escritório para uso em diferentes projetos	Capacidade avançada de desenvolver script
SMART Form	Avaliação, otimização	Desenvolvido pelo escritório para uso em diferentes projetos	Capacidade avançada de desenvolver script
Multi-objective optimization	Avaliação, otimização	Desenvolvido pelo escritório para uso em diferentes projetos	Capacidade avançada de desenvolver script

Fonte: Autoria própria

Nos estágios de geração e representação, os dois principais softwares utilizados foram o Rhino 3D e o Digital Projects associado a softwares de otimização. O primeiro foi utilizado durante o processo de concepção da forma. Diretamente associada ao Rhino, foram usados programas que avaliavam (simulavam) e otimizam as soluções. Destacam-se os softwares desenvolvidos pelo escritório Buro Happold: SMART Form (criação de malha estrutural e otimização topológica, Figura 5.17a), *Multi-objective optimization* (desempenho estrutural e ambiental) e o SMART Sizer - otimização no dimensionamento das peças (Figura 5.17b).

Figura 5.17 Estudos de otimização da cúpula



Nota: a) Otimização usando o SMART Form; b) Otimização da estrutura com condicionantes ambientais

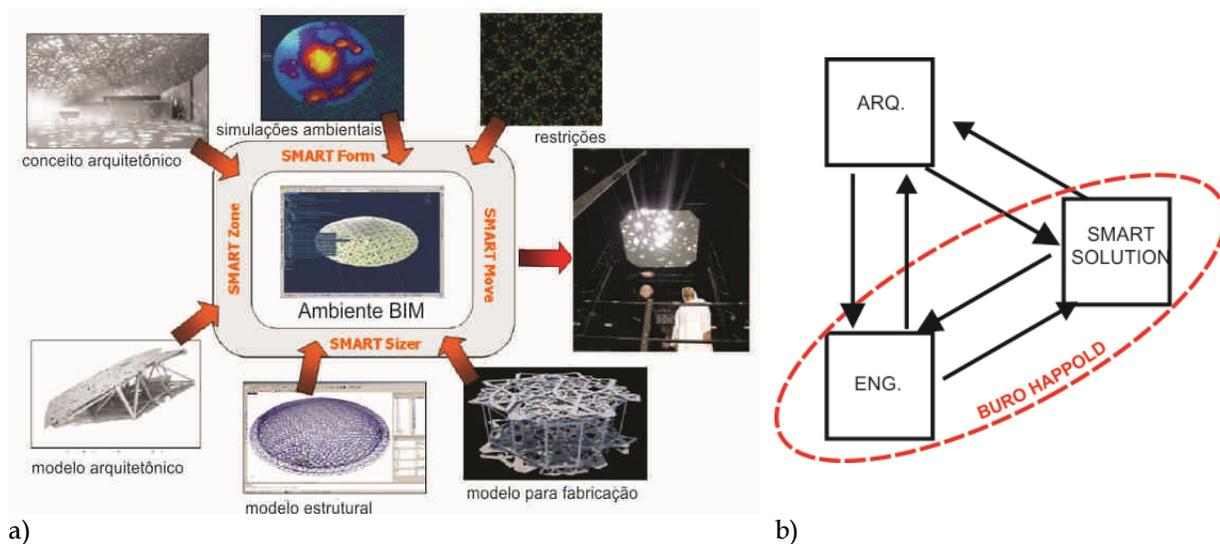
Fonte: a, b <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions>>

5.4.1.5 Processo de Projeto: interoperabilidade e colaboração

Não só foi possível existir uma boa interoperabilidade entre softwares, como também era necessário que houvesse, e isso foi motivado pelo fato de o projeto ser essencialmente colaborativo. Essa foi uma das razões pela qual se utilizou uma única plataforma de software. Com uma única plataforma, coordenou-se o modelo e houve um controle detalhado de toda a geometria em suas diferentes disciplinas. Esse trabalho, de acordo com Fischer (informação verbal), deu-se por meio de um modelo centralizado, que consistia num ambiente BIM que integrava as diferentes soluções. Com esse modelo, puderam-se gerar todos os demais modelos utilizados (Figura 5.18a).

A colaboração na disciplina de projeto se deu principalmente com a integração das equipes localizadas nos escritórios de engenharia e arquitetura (Figura 5.18b). No escritório Buro Happold, a equipe de engenharia trabalhava colaborativamente com a equipe do SMART Solution e com a equipe de arquitetura. A equipe do SMART Solution trabalhava também muito próxima do escritório de arquitetura, sem perder o vínculo com a equipe de engenharia.

Figura 5.18 Modelo de integração e colaboração entre as equipes de projeto



Nota: a) Por meio do uso de uma plataforma BIM foi possível associar todas as soluções num modelo centralizado; b) Modelo de colaboração entre as equipes (destaque em vermelho para a colaboração entre as equipes do SMART Solution e engenharia)

Fonte: a <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions>>; b: Autoria própria

5.4.1.6 Processo de Projeto: geração da forma

O método descrito a seguir foi usado no processo de geração da forma da cúpula.

A cúpula é composta de uma estrutura de armação espacial constituída por múltiplas camadas. A parte externa da pele é composta por cinco camadas. A parte interna é composta por outras cinco camadas. A profundidade dessa malha estrutural é de seis metros. Toda a malha foi constituída por meio da ideia do arquiteto que evocava o uso de um padrão geométrico que remetesse a uma tradição árabe. Esse se constituiu por um padrão básico de tecelagem baseado numa transformação geométrica de quadrados formando triângulos (Cf.Figura 5.14). A complexidade da geometria foi resultado da relação entre o efeito fractal da iluminação entre todas as camadas da cobertura. Essa estrutura, suportada por diversas camadas, foi elaborada durante a geração da forma, como parte de um modelo paramétrico único, conforme explicitou Fisher (informação verbal).

Fisher acrescenta que o ponto-chave foi o estabelecimento de uma ideia bem madura e muito clara para toda a equipe de projeto. Um conceito que fosse muito fácil dizer e muito fácil esboçar. O conceito era o elemento principal do projeto, o esboço era apenas para complementar alguns aspectos do conceito. O projeto caracterizou-se por um padrão (*pattern*) projetado ao longo de uma série de camadas da superfície do domo (calota esférica), que atendeu a alguns requisitos ambientais e de ficar em pé.

A etapa inicial do processo de projeto se deu pela realização de esboços de formas livres. Nessa fase o arquiteto tinha modelado em Rhino e gerou uma geometria básica de modo ainda manual. Contudo, esse ainda era um modelo bastante bruto, sem nenhuma ligação com exigências ambientais. Era apenas uma representação geométrica dos conceitos apresentados.

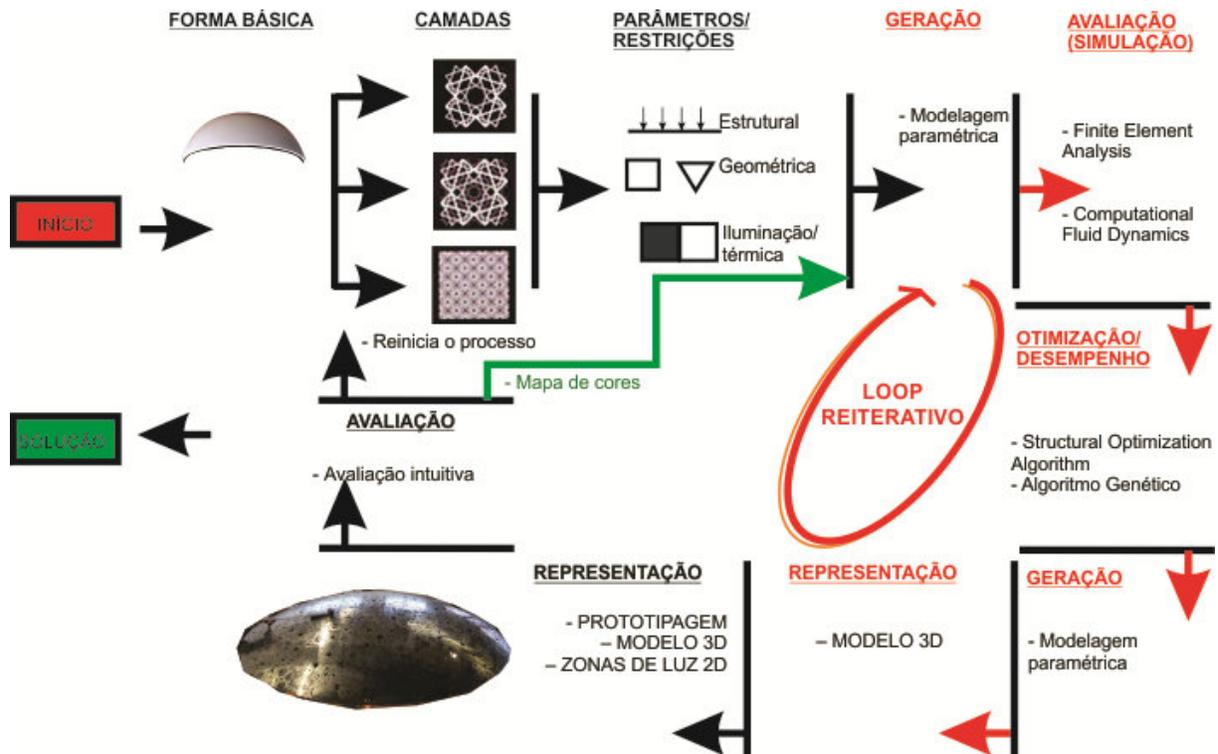
O primeiro projeto escultural foi desenvolvido usando modelagem paramétrica, mas com elementos de peso constante. Surge então a intenção em automatizar o processo de perfuração do diâmetro da cúpula, de modo a responder diretamente aos requisitos de iluminação dos espaços do museu sob a cúpula. O modo utilizado para isso foi por meio da criação de critérios de desempenho, associado a processos automatizados, como motores da geração da forma.

Toda a geometria da cúpula foi coordenada por um padrão central, em que todas as partes estavam relacionadas umas com as outras. Os pontos de conexão entre os elementos garantiam que todas as partes estivessem articuladas. Assim, a automação baseada em critérios ambientais transformou todos os elementos individuais, e a automação baseada nas forças estruturais forçou a estrutura de todos os elementos individuais do espaço. Esse processo ocorreu por meio de checagens utilizando softwares de análise na área ambiental e estrutural. Os dados dos resultados das análises foram alimentados nos modelos centrais do projeto digital de modo automatizado. Por meio da escolha das melhores soluções, o sistema ia criando a geometria do edifício.

Entre os desafios do projeto, estavam o tamanho do modelo e a geração de dados digitais que pudessem ser utilizados em todo o desenvolvimento do projeto digital. Partiu-se para usar um modelo de integração importado da indústria automotiva e aeroespacial, complementou Fisher (informação verbal).

A chave do projeto era que ele fosse capaz de redefinir sua geometria por meio dos dados de análises alimentados pelo sistema. Ao mesmo tempo, o sistema deveria ser flexível de modo a permitir ao arquiteto dizer que em uma determinada área ele precisava de um nível de iluminação diferente de outra área. De fato, o que se passou nesse projeto foi que o arquiteto pôde literalmente pintar os requisitos de iluminação e automaticamente novos efeitos de luz eram criados por meio de mudanças nas aberturas da cobertura. Toda a geração da complexa geometria que compunha a cobertura foi automatizada e sua interação se deu de modo muito intuitivo, de acordo com uma interface caracterizada por um mapa de cores, desenvolvido pela equipe de Buro Happold. Nessa interface os arquitetos podiam apenas mudar o mapa de cores e toda a geometria era recalculada e otimizada, visando adaptar a esse novo padrão de luz proposto pelo arquiteto.

Figura 5.19 Processo de geração da forma, da forma inicial (vermelha) à solução (verde)



Fonte: Autoria própria

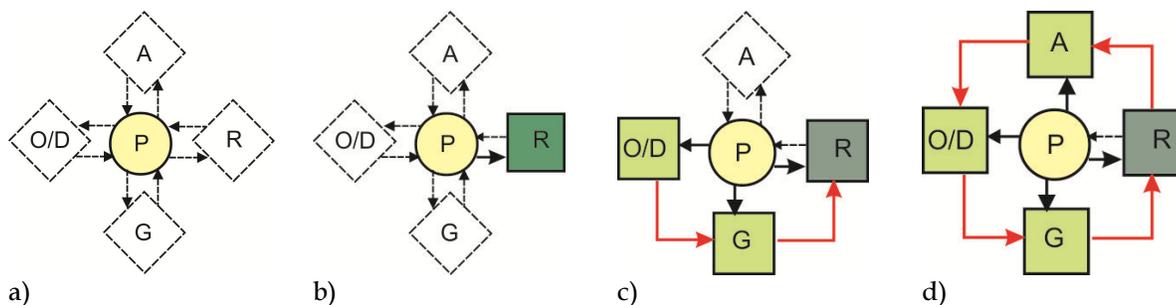
De maneira resumida, o processo de geração da forma pode ser definido por alguns passos (Figura 5.19). O primeiro passo foi a definição do conceito por parte do arquiteto. Associado ao conceito definiu-se uma forma básica composta por uma cúpula vinculada a alguns padrões geométricos. Definiram-se critérios de desempenho a serem seguidos durante o processo de geração da forma, expresso por parâmetros e restrições: carga estrutura, geometria e iluminação. Com base nessa ideia básica, um modelo ainda impreciso foi construído no Rhino. Em seguida, fizeram-se simulações em software computacionais utilizando-se técnicas como Análise de Elemento Finito e Dinâmica de Fluido Computacional.

Passou-se por um processo de otimização, e geraram-se novas formas. Nessa fase, o uso de algoritmo genético permitiu a geração de formas mais coerentes com as soluções pretendidas. As novas formas foram representadas em modelos 3D, protótipo e *Mock-up*. Na etapa seguinte, os arquitetos avaliavam de modo intuitivo a luminosidade dos ambientes. Por meio da interface de mapa de cores, alteravam a forma da estrutura. Novamente eram avaliadas, otimizadas, geradas e representadas. Em outras situações, alteraram-se alguns parâmetros de projeto.

5.4.1.7 Modelo Digital e Nível de Automação

Por meio de uma estrutura conceitual de modelo de projeto digital proposto por Oxman (2006), o que se pôde observar durante o processo de geração da forma foi a existência de quatro principais classes de interação e relação de projetistas e componentes do projeto digital (Figura 5.20). A primeira classe (Figura 5.20a), analógica, apareceu nos primeiros momentos do processo de projeto quando o arquiteto esboçou formas básicas e padrões de tecelagem (cf. Figura 5.14). Essa classe também ocorreu, de modo mais escasso, em outros momentos do processo de projeto. A segunda classe (Figura 5.20b), já digital, deu-se com a criação da forma inicial no software Rhino e posteriores ajustes na geometria para se adaptar a questões estéticas e funcionais do projeto. A terceira classe (Figura 5.20c) deu-se por meio do uso da interface de mapa de cores e das avaliações em cima de Mock Up na escala 1/1. Nesse caso, o estágio de avaliação era de modo manual e os demais estágios eram automatizados. A quarta classe (Figura 5.20d) ocorre em algumas sequências de decisão, quando o sistema gerava formas de modo completamente automatizado.

Figura 5.20 Modelos de projeto digital utilizados no projeto da Cúpula do Museu Abu Dhabi



Fonte: Autoria própria

O processo de morfogênese constituiu-se por ter sequências quase sempre automatizadas, intercaladas por sequências semiautomatizadas e sequências manuais, estas últimas mais intuitivas. A avaliação por parte dos arquitetos dos requisitos de iluminação ocorreu porque essa era uma decisão essencialmente intuitiva, baseada em sensibilidade do projetista e difícil de ser considerada em um sistema computacional. Avaliações precisavam ser realizadas em protótipo e *Mock-up*, de modo manual.

5.4.2 ESTUDO DE CASO 2: extensão da Hochschule für Technik (HfT)

5.4.2.1 Escritório: Laboratory for Visionary Architecture (LAVA)

O escritório de arquitetura Laboratory for Visionary Architecture (LAVA) é uma empresa de pequeno porte que trabalha numa rede de colaboração entre as cidades de Stuttgart (Alemanha), Sydney (Austrália) e Abu Dhabi (Emirados Árabes). Foi fundado em 2007 por Chris Bosse (LAVA Asia Pacific) e Tobias Wallisser (LAVA Stuttgart). Alexander Rieck (LAVA Stuttgart) é o terceiro sócio do escritório. Antes de criarem a firma, esses arquitetos participaram de grandes projetos. Bosse trabalhou no projeto do Watercube Swimming Center (Pequim) e Wallisser no Stuttgart Mercedes-Benz Museum. Ambos têm carreira acadêmica.

O escritório LAVA utiliza a arquitetura digital como meio de responder a questões ambientais, de modo a integrar as tecnologias computacionais à qualidade de vida. Para isso, busca definir novas bordas na criação do espaço da arquitetura e da cidade visando a sustentabilidade (LAVA, 2011). Por meio de novas metodologias de projeto e de parcerias com outros escritórios, tem buscado o uso de tecnologias avançadas e sustentáveis visando inspirar novas gerações.

5.4.2.2 Projeto: extensão para o Hochschule für Technik (HfT)

Informações técnicas do projeto

O Quadro 5.17 apresenta a ficha técnica do projeto.

Quadro 5.17 Informações técnicas da Extensão da Hochschule für Technik

<i>Informação</i>	<i>Descrição</i>
Nome do projeto	Extensão da Hochschule für Technik
Localização	Stuttgart (Alemanha)
Características	Edifício da Nova Faculdade de Arquitetura
Área total	6.272 m ² (incluindo os espaços vazios)
Área do pavimento tipo	784 m ² (incluindo os espaços vazios)
Número de pavimentos	8
Altura	32 m
Altura do piso	4m
Dimensão do módulo	4m X 4m X 4m
Ano do projeto	2009
Status do projeto	Não construído

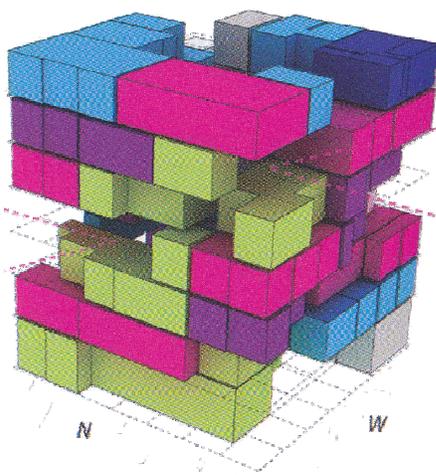
Cliente	Hochschule für Technik (Competição)
Arquiteto	Laboratory for Visionary Architecture (LAVA)
Engenheiro estrutural	Bollinger + Grohmann

Fonte: A autoria própria

Descrição do edifício

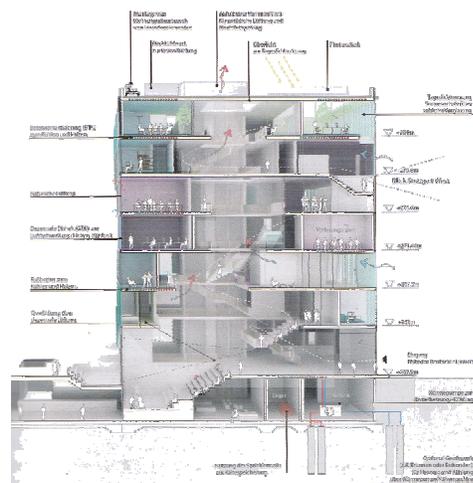
O projeto da Extensão da *Hochschule für Technik* realizou-se como parte de uma competição para a construção do anexo da nova faculdade de arquitetura da *Hochschule für Technik*. Segundo o arquiteto Tobias Wallisser (informação verbal),¹⁹ o principal objetivo da participação do escritório LAVA nessa competição foi testar novos conceitos na área de processo de projeto digital em uma experiência real de projeto, composta por sítio constituído por diferentes tipos de edifícios e diferentes elementos urbanos (Figura 5.21).

¹⁹ Entrevista concedida por Tobias Wallisser, diretor do Escritório LAVA, Stuttgart, em 23 de fevereiro de 2011. Figura 5. Erro! Apenas o documento principal. O edifício se assemelha conceitualmente a uma esponja



a)

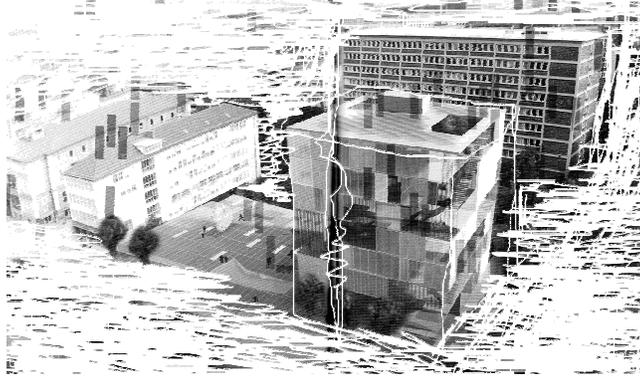
Nota: a) a estrutura é composta por módulos baseados em cubos de 4 metros de lado; b) internamente o espaço é fluido e permeável



b)

Fonte: Bollinger; Grohmann; Tessmann (2010, p. 36-37)

Figura 5.21 Implantação da extensão da Hochschule für Techni, Stuttgart, 2009

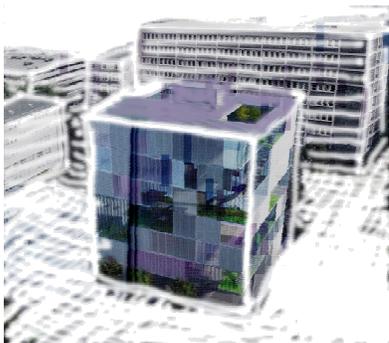


Fonte: Bollinger; Grohmann; Tessmann (2010, p. 34)

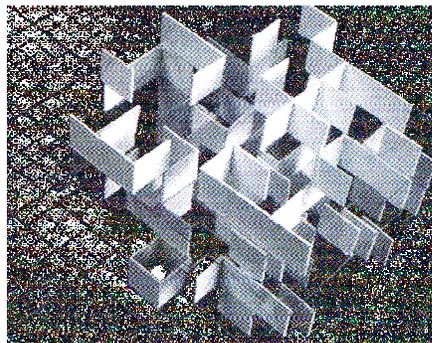
O projeto proposto pelo escritório LAVA – com o escritório Bolling + Grohmann – é um *continuum* espaço tridimensional caracterizado por uma rede complexa de espaços, vazios e estruturas que deveriam proporcionar uma variedade de espaços funcionais (Figura 5. **Erro! Apenas o documento principal.**a, b). O projeto vai além do conceito presente no projeto da Maison Do-Mi-No de Le Corbusier, oferecendo flexibilidade de configuração em vários níveis (BOLLINGER, GROHMANN, TESSMANN, 2010).

Em termos programáticos, o edifício não é tão complexo. É composto por oito tipos de espaços, modulados em quadrados de 4 metros de lado. Ao todo, são oito andares compostos por uma base quadrada de 7 x 7 módulos. Cada módulo tem altura de 4 metros. De acordo com o uso dos ambientes, os módulos poderiam ser divididos ou combinados. No final do projeto, foi possível ter um edifício tão puro externamente que poderia dialogar com o ambiente urbano (Figura 5.22a) e também tão flexível e complexo que poderia dar maior dinâmica ao espaço interior do edifício (Figura 5.22b).

Figura 5.22 Vistas volume externo (a) e distribuição dos espaços interna



a)



b)

Nota: a) externamente o edifício é um volume puro que se integra ao entorno; b) internamente é formado por uma complexa estrutura, definida por planos verticais e horizontais, intercalados por vazios

Fonte: Bollinger; Grohmann; Tessmann (2010, p. 34, 37)

5.4.2.3 Processo de projeto: geometria e forças

Geometria

Quando técnicas digitais de geração da forma foram utilizadas no processo de projeto, os princípios geométricos da forma inicial ainda eram ideias conceituais de espaço, suportadas por uma forma básica. Em termos de espaço, caracterizava-se por um conceito geral, que ainda precisava emergir como forma arquitetônica.

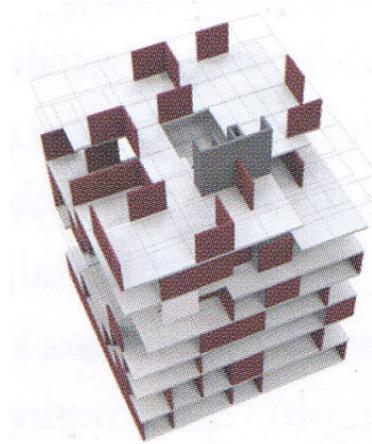
A proposta do projeto guiou-se por requisitos programáticos (algumas áreas podiam ser definidas por uma densa estrutura, outras com estrutura menos densa) e requisitos de ótima estrutura, que poderiam conectar diferentes partes do edifício. Desde o início do processo de projeto, não se sabia necessariamente a estética final. Ela emergiu com base nas interações de conceitos arquitetônicos, do ótimo sistema estrutural e de algumas decisões arquitetônicas relacionadas com o programa de necessidades.

Do ponto de vista do princípio das categorias geométricas empregadas, a forma emergiu baseada em dois níveis de estruturas geométricas:

- Geometria de matemática básica – baseado na definição do volume externo (prisma de base quadrada) –Figura 5.23a.
- Encontrar a forma – buscou-se encontrar o sistema estrutural ótimo, baseado em restrições estruturais aplicados a esquema de programa arquitetônico (Figura 5.23b).

O Quadro 5.18 sintetiza as características geométricas do processo de geração da forma. As categorias geométricas usadas na geração da forma foram: a geometria de matemática básica (para definir o volume externo) e um processo de encontrar a forma (para definir a morfologia dos espaços internos). Usou-se, portanto, uma categoria híbrida.

Figura 5.23 Níveis de estruturas geométricas do edifício



a)

b)

Nota: a) volume externo definido por um prisma de base quadrada; b) espaço interno definido por uma série de planos verticais, horizontais e vazios.

Fonte: Bollinger; Grohmann; Tessmann (2010, p. 37)

Quadro 5.18 Características da geometria do edifício

Projeto	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
Extensão da Hochschule für Technik	Geometria básica	Híbrida (geometria matemática básica + encontrar a forma)

Fonte: Autoria própria

Forças

As forças usadas foram: a carga estrutural, o programa de necessidades e as perspectivas do lugar (Quadro 5.19). A carga estrutural era a principal força considerada durante o processo de otimização; o programa de necessidades e a perspectiva do lugar eram forças secundárias, associadas a regras de ocupação do espaço e restrições de projeto. O movimento de pessoas no espaço era um critério importante para definir as articulações entre cheios e vazios. Estava associado ao programa de necessidades. A perspectiva do lugar estava associada às visuais do interior e exterior do edifício. O Quadro 5.19 sintetiza as principais forças.

Quadro 5.19 Forças-guia no processo de geração da forma do edifício

Projeto		Forças	
Extensão da Hochschule für Technik	Carga estrutural	Programa	Perspectiva do lugar

Fonte: Autoria própria

5.4.2.4 Processo de Projeto: técnicas e softwares

Técnicas

O Quadro 5.20 descreve as principais técnicas utilizadas. A principal técnica usada na etapa de Otimização/Desempenho foi o Algoritmo Genético.

Quadro 5.20 Técnicas digitais utilizadas na geração da forma do edifício

Técnica	Estágio ciclo decisão	Loop reiterativo com
Modelagem paramétrica	Geração	Representação
	Representação	Avaliação
Algoritmo Genético	Geração, Otimização/Desempenho	Avaliação
Prototipagem	Representação	Avaliação
Análise de Elemento Finito	Avaliação	Otimização/ desempenho
Scripting	Geração, otimização/ desempenho, avaliação	Geração, otimização/ desempenho, avaliação, representação

Fonte: Autoria própria

Softwares

Os critérios para a escolha dos softwares foram: ferramentas de uso comum dos escritórios de arquitetura e engenharia; fáceis de desenvolver scripts nessas ferramentas. Após discussões entre os escritórios LAVA e Bollinger + Grohmann, definiu-se utilizar como software de geração o Rhino. O escritório LAVA iniciou o trabalho com o software Rhino e o escritório Bollinger + Grohmann desenvolveu um programa computacional, em forma de plug-in, para otimizar os aspectos de estrutura do projeto.

O Quadro 5.21 mostra que os principais softwares usados foram o Rhino + Grasshopper + script associado ao Sofistik, que era responsável pelas análises estruturais.

Quadro 5.21 Softwares utilizados na geração da forma do edifício

Software	Estágio do ciclo de decisão	Tipo de solução	Habilidades para uso
Rhino	Representação	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
Programa de computador no Rhino + Grasshopper	Geração	Desenvolvido pelo escritório para uso em projeto específico, vinculado à solução comercial de software	Capacidade avançada de desenvolver script
	Otimização		
Sofistik	Avaliação	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script

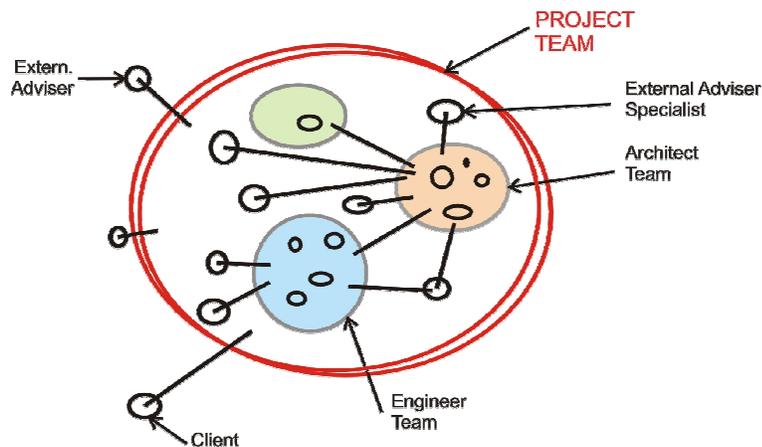
Fonte: Autoria própria

5.4.2.5 Processo de Projeto: interoperabilidade e colaboração

Durante o processo de geração da forma do edifício, os projetistas não tiveram dificuldades de interoperabilidade. O principal formato de troca de arquivo era no formato do Rhino (*.3DM). Esse formato foi utilizado para troca de arquivos entre arquitetos e engenheiros. Para a utilização das ferramentas de avaliação e otimização, pelo fato de se utilizar o Sofistik e um programa computacional que rodava já no Rhino, não houve problemas de interoperabilidade.

A colaboração, de acordo com Wallisser (informação verbal), era intensa e ocorreu desde os primeiros conceitos e durante todo o processo de geração da forma. Para descrever o perfil de colaboração utilizado, Wallisser esboça um esquema típico de colaboração utilizado no seu escritório (Figura 5.24). Para ele, existe um grande time de projeto. De acordo com as exigências do projeto, esse time é auxiliado por consultores externos. Internamente esse time é desmembrado em vários outros, que estavam sempre articulados colaborando durante as decisões mais pertinentes de projeto.

Figura 5.24 Modelo de colaboração descrito por Wallisser



Fonte: Autoria própria

5.4.2.6 Processo de Projeto: geração da forma

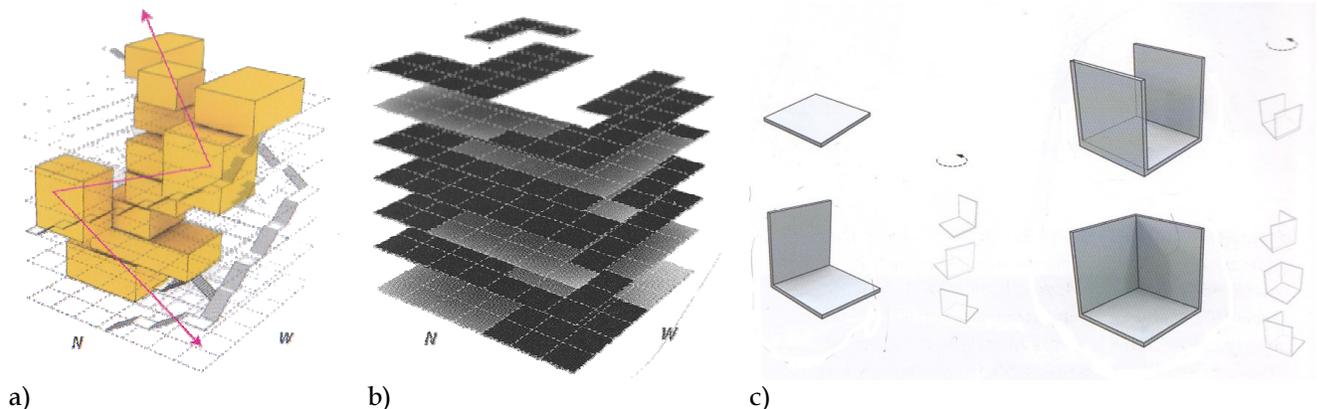
Para responder aos problemas de projeto, o escritório LAVA procurou um bom relacionamento com o ambiente urbano, em termos de articulação do volume com a escala e gabarito do entorno. Após se definir essas condições, pôde-se trabalhar com os elementos abstratos dentro de um volume puro. Definiu-se que o edifício externamente seria composto por um prisma de base quadrada, com oito andares de altura e internamente uma estrutura flexível definida por planos e vazios, segundo Wallisser (informação verbal).

Em vez de trabalhar com uma geometria de forma livre, algo comum nos projetos desenvolvidos pelo escritório LAVA, por motivos do contexto urbano, resolveu-se reduzir a geometria externa a um cubo. Para a definição do espaço arquitetônico, buscou-se formas de transformar o simples cubo em algo realmente interessante. Nesse caso, o principal problema foi como definir a flexibilidade interna em um edifício vertical.

Para responder a essa questão, o escritório LAVA – com a Firma Bollinger + Grohmann – criou a ideia de um container de 4m x 4m x 4m que continha as paredes e lajes do edifício. Depois disso, pensou na maneira de como organizá-los. O primeiro ponto foi a definição de um volume programático, que era um bloco simples com linhas de visuais, relacionamentos, etc. (Figura 5.25a). Essa definição foi importante porque os arquitetos não queriam colunas que cortassem as linhas visuais ao longo do edifício. Então eles tiveram de predefinir a organização

dos volumes dentro do edifício: “[...] agora temos essa parte aberta, que vai gerar um *continuum* através do edifício [...] e nós precisamos de alguns pisos, nós necessitamos de paredes, nós temos de posicionar os pisos”, afirma Wallisser (informação verbal).

Figura 5.25 Principais definições da forma



a) Nota: a) volume programático, linhas visuais (em vermelho) e relações; b) mapa binário; c) opções de disposição da estrutura: laje, laje e uma parede, laje e duas paredes adjacentes e laje e duas paredes não adjacentes

Fonte: Bollinger; Grohmann; Tessmann (2010, p. 37)

Com base nessas ideias, começou-se a desenvolver um sistema em que fosse possível determinar as partes consideradas como paredes, que partes seriam os pisos e as que seriam os vazios. Para identificá-las, o LAVA criou um mapa binário com diferentes tonalidades (Figura 5.25b). Isso possibilitou a criação de regras simples: se o quadrado fosse preto, então não deveria haver estrutura nessa área; se o quadrado fosse branco, poderia ser construída estrutura nessa área. Nesse mapa a estrutura podia ser combinada em quatro diferentes formas: uma placa horizontal (laje); uma placa vertical e uma placa horizontal (parede e laje); duas placas verticais adjacentes e uma placa horizontal (2 paredes e laje); e duas placas verticais paralelas e uma placa horizontal – 2 paredes e laje (Figura 5.25c).

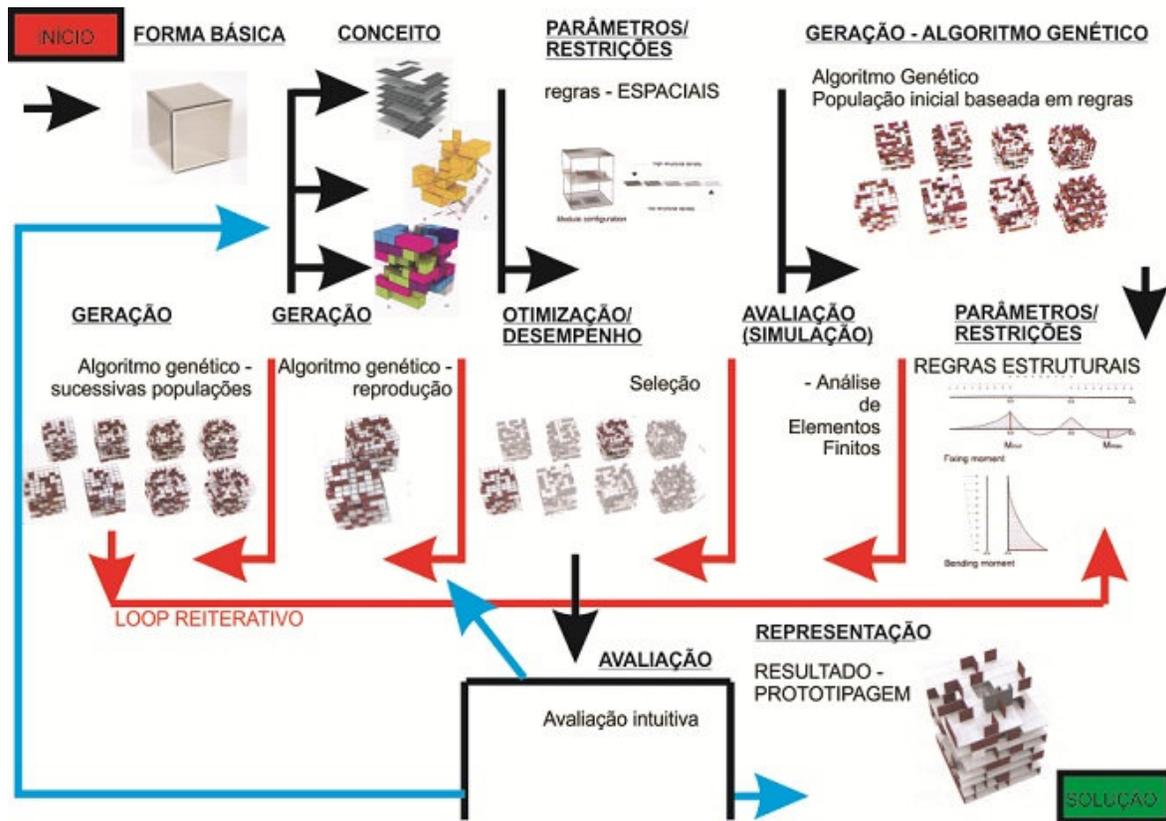
O mapa de entrada e as regras foram os pontos de partida para o sistema generativo. Esse sistema desenvolveu a estrutura de modo que não poderia ser posicionado em algumas áreas. Com base nessas configurações preconcebidas, cada célula branca da malha pôde ser populada com um modelo estrutural consistindo de duas, uma ou nenhuma parede estrutural para criar os componentes do espaço, de acordo com Wallisser (informação verbal). Desse modo, foi possível ter elementos com ou sem parede, com tamanhos e orientações diferentes.

No final, realizou-se um processo de otimização da solução inicial, utilizando-se critérios de desempenho das cargas estruturais. Iniciou-se com uma geração em que continha 50 versões do edifício, criadas de modo aleatório. Em seguida, avaliou-se essa primeira geração. Usaram-se três critérios de avaliação para classificar as diferentes soluções: momento vertical de flexão das lajes sob cargas mortas; momentos fletores horizontais nas paredes de cisalhamento sob cargas laterais; e colocação das paredes de cisalhamento em relação a células propriamente ditas (BOLLINGER; GROHMANN; TESSMANN, 2010).

Esse processo realizou-se com a criação pelo escritório Bolling + Grohmann de um algoritmo capaz de descrever um sistema de configurações que avaliava a escolha de descendentes por meio daquelas soluções que tivessem o menor momento fletor e a melhor composição das paredes, de acordo com as propriedades das células. As gerações seguintes basearam-se nas melhores soluções anteriores. Com a recombinação do genótipo (*crossover*), durante a reprodução e a mutação aleatória, tornou-se possível a existência de variações dentro da população, segundo Wallisser (informação verbal) -Figura 5.26.

Depois de mais de 200 gerações, o processo resultou em um sistema que era adaptado a múltiplos critérios arquitetônicos, enquanto, ao mesmo tempo, cumpria as necessidades estruturais (BOLLINGER; GROHMAN; TESSMANN, 2010). No final, havia elementos com e sem paredes, diferentes orientações de paredes, vários tamanhos de vazios, etc. Depois de sucessivas gerações, o escritório LAVA voltou a pensar em qual seria a condição de ótimo programa de necessidades. Este trabalho serviu como meio de checar se as orientações eram melhores ou não, se a fachada estava condizente ou se eram necessárias mudanças. Nesse ponto, o escritório LAVA, por ser de arquitetura, realizou alterações no modelo de modo a torná-lo menos ótimo, em termos de projeto estrutural, porém, integrado a outros aspectos do projeto, como a perspectiva interna e externa, a espacialidade, etc. “A combinação de regras automáticas e decisões manuais é o melhor meio de se trabalhar o projeto”, assegura Wallisser (informação verbal).

Figura 5.26 Processo de geração da forma, com indicação da forma inicial, os estágios e a solução



Fonte: Autoria própria

A principal mudança paradigmática de projeto, de acordo com Bollinger, Grohmann e Tessmann (2010), foi o projeto estrutural ser guiado por um conceito de uso de técnicas digitais em todas as fases do projeto. O uso de Análise de Elementos Finitos (FEA) permitiu avaliar a estrutura para além das classes tradicionais de avaliação da estrutura, calcadas em um perfil de blocos tipológicos (BOLLINGER; GROHMANN; TESSMANN, 2010, p. 39). No final, o projeto pôde ser constituído por diferentes tamanhos de espaços (espaços pequenos, médios e grandes), utilizando uma estrutura com espessura constante, o que significou o uso do comportamento de uma malha de elementos interconectados em vez de utilizar uma tipologia de uma estrutura simples (BOLLINGER; GROHMANN; TESSMANN, 2010).

Nesse projeto, utilizou-se a estrutura como o principal desempenho de projeto. Utilizou-se a análise de dados como “feedback que alimentava o modelo generativo e que servia como guia do projeto, ao invés de uma base para um simples processo de pós-racionalização”

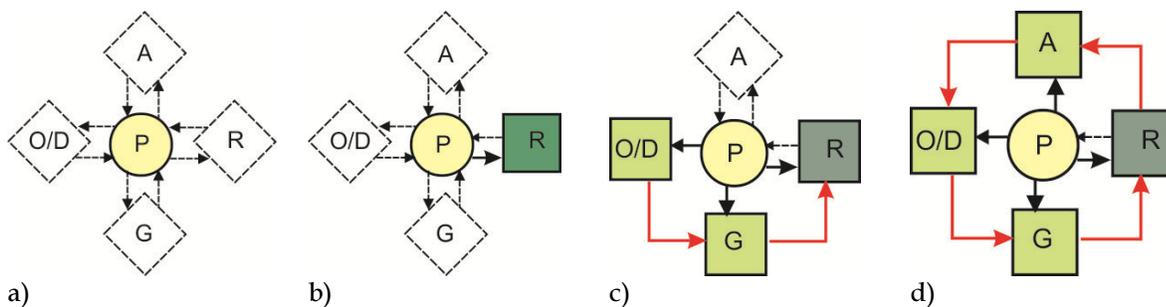
(BOLLINGER; GROHMANN; TESSMANN, 2010, p. 29). Os demais elementos de desempenho combinados foram introduzidos também como parte do desenvolvimento de projeto.

De acordo com Wallisser (informação verbal), substituiu-se o esboço por palavras. As palavras é que tornaram possível caracterizar uma série de regras que trabalhavam num módulo espacial, que pôde ser combinado em uma malha espacial de cubos de 4 metros de lado. Por fim, pode-se dizer que os principais elementos do projeto foram: dimensões horizontais; dimensões verticais; mapa urbano (mapa binário); uma série de regras que foram usadas na preparação do modelo digital performativo.

5.4.2.7 Modelo Digital e Nível de Automação

Foram quatro as principais classes de interação e relação de projetistas e componentes do projeto digital (Figura 5.27). A primeira foi analógica (Figura 5.27a). Apareceu nos primeiros momentos do processo de projeto, quando o arquiteto fez esboços do cubo e de alguns padrões de composição. A segunda (Figura 5.27b), já digital, ocorreu no final do processo de geração da forma, após 200 gerações. Por meio de alterações na forma usando o Rhino, foi possível adaptar as soluções geradas à questões estéticas e funcionais do projeto. A terceira classe (Figura 5.27c) ocorreu no final de alguns ciclos. Neste momento os projetistas alteravam as regras e o mapa binário e a forma era novamente gerada. Nesse caso, a avaliação ocorria de modo manual e os demais estágios eram automatizados. A quarta classe (Figura 5.27d) ocorreu em algumas sequências de decisão, quando o sistema era completamente automatizado.

Figura 5.27 Modelos de projeto digital utilizados na geração da forma do edifício



Fonte: Autoria própria

A existência de diferentes classes de modelo de projeto digital, algumas manuais, outras semiautomatizadas e automatizadas, permitiu diferentes tipos de interação de arquitetos com

engenheiros. Além disso, possibilitou a otimização do sistema estrutural do projeto, revisão das configurações espaciais, por meio de novos arranjos de soluções, e, principalmente, permitiu que, no final, os arquitetos escolhessem a forma, que era menos ótima em termos de estrutura, mas que era capaz de integrar outros aspectos de projeto que, segundo Wallisser (informação verbal), eram muito importantes para a qualidade espacial do edifício.

5.4.3 ESTUDO DE CASO 3: Smithsonian Institution Courtyard Enclosure

5.4.3.1 Escritório: Foster + Partners / Specialist Modelling Group (SMG)

A prática de projeto no escritório Foster + Partners organiza-se entre seis equipes de projeto; cada uma delas, gerenciada por um arquiteto líder sênior. Elas são auxiliadas por alguns grupos que atuam em disciplinas especializadas, incluindo: materiais e meio ambiente, projeto de produto, planejamento do espaço, projeto de interiores, visualização, modelagem 3D, entre outros (FREIBERGER, 2007).

O grupo especializado na modelagem digital 3D denomina-se *Specialist Modelling Group* (SMG). O SMG foi fundado em 1997. Atualmente é liderado pelo arquiteto Xavier de Kestelier. Desde a sua fundação, o SMG já participou diretamente em mais de 100 projetos, entre os quais o Swiss Re Headquarter, a Sage Gateshead Music Centre, o London City Hall, o Albion Riverside Residence, o novo Beijing International Airport.

Por meio de avançados conhecimentos computacionais, o SMG auxilia as seis equipes de projeto no estudo das soluções mais apropriadas e na comunicação dos dados entre o Foster + Partners, os consultores e contratantes. Baseado em um conhecimento profundo sobre geometria e modelagem paramétrica, e na criação e otimização de programas computacionais, o SMG tem contribuído com a melhoria do desempenho do edifício e com sua estética.

Além de serem arquitetos e engenheiros, os membros do SMG são especialistas em ciências matemáticas e computação, e atuam em áreas como geometria complexa, simulação do ambiente, modelagem paramétrica, programação computacional. Dos oito membros, sete são arquitetos de profissão e um é engenheiro - engenharia de computação (FREIBERGER, 2007). Quando desenvolvidos projetos com geometria baseada em matemática complexa, a equipe

recorre a consultores especializados na área. Segundo De Kestelier, o que se faz é uma análise preliminar de cada projeto, dentro da equipe, e quando se precisa de conhecimentos mais especializados, buscam-se os consultores externos. Quando isso ocorre, o SMG funciona como ponto de contato entre os consultores especializados e os projetistas das equipes encarregadas do desenvolvimento do projeto, acrescentar De Kestelier (informação verbal).²⁰

Enquanto a matemática é um conhecimento inerente às atividades do SMG, De Kestelier (informação verbal) mostra que o conhecimento em projeto de arquitetura é o que os qualifica para seu trabalho: “[...] o importante é perceber que somos os arquitetos que fazem a programação, não programadores que trabalham em arquitetura.” Uma das principais tarefas do SMG não é a modelagem digital, mas é entender quais são os parâmetros de projeto e como transformá-los em regras que possam ser utilizáveis num sistema computacional.

5.4.3.2 Projeto: Smithsonian Institution Courtyard Enclosure

Informações técnicas do projeto

Para compreender melhor o estudo de caso, o Quadro 5.22 apresenta as informações gerais sobre o projeto. Estas informações mostram que, embora seja um projeto pequeno, apresenta uma equipe multidisciplinar e multinacional, com uma quantidade grande de consultores especializados.

Quadro 5.22 Informações técnicas do projeto

<i>Informação</i>	<i>Descrição</i>
Nome do projeto	Smithsonian Institution Courtyard Enclosure (SICE)
Localização	Washington, DC (Estados Unidos)
Características	Cobertura para o novo pátio central
Área total do pátio central	2.538m ²
Altura pátio central	36 metros
Número de colunas	8
Ano do projeto	2004/2007
Status do projeto	Construído
Cliente	Smithsonian Institute
Arquiteto	Foster + Partners
Co-arquitetos	Smith Group Inc.

²⁰ Entrevista concedida por Xavier de Kestelier, diretor do Specialist Modelling Group, em Londres, 15 de fevereiro de 2011.

Engenheiro estrutural	Buro Happold
Consultores	Davis Langdon LLP, URS Corporation, Gustafson Guthrie Nichol Ltd, George Sexton Associates, Battle McCarthy, Davis Langdon Schumann Smith, Emmer Pfenninger Partner, Josef Gartner USA, Sandberg, Sandy Brown Associates, Shen Milsom Wilke

Fonte: Autoria própria

Descrição do edifício

O Smithsonian Institution ocupa o edifício do antigo United States Patent Building. Em 2000, iniciou um projeto de renovação, para restauração do edifício. Em 2003, fez-se um concurso internacional para a realização do projeto (PETERS, 2007). A proposta da equipe de Foster + Partners foi a vencedora (Figura 5.28); ela envolvia a construção de um grande espaço central com uma cobertura de vidro fluida apoiada em apenas 8 colunas e a criação de espaço de eventos flexível, utilizada para recepções, apresentações, jantares, shows, etc. A proposta de Foster + Partners buscou “[...] fazer mais com menos [...]” (PETERS, 2007).

Figura 5.28 Imagens internas do SICE



a)

b)

c)

Nota: a, b) imagens cobertura interna; c) estrutura das malhas das vigas com destaque para o painel acústico

Fonte: <<http://www.fosterandpartners.com>>

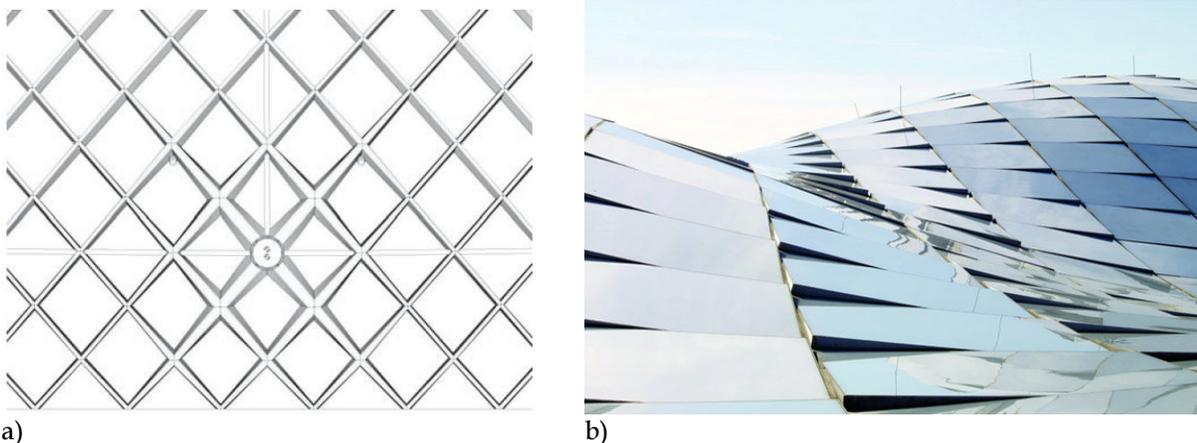
A cobertura é uma elegante estrutura em malha levemente ondulada (Figura 5.28a), capaz de atender a uma série de requisitos como requisitos estruturais (incluindo suporte ao peso da neve); proteção a chuva; absorvente acústico; proteção contra a incidência direta do sol (PETERS, 2007). A forma da cobertura em planta é retangular, com uma dimensão maior que as dimensões do pátio inferior e a altura nas bordas quase constante. A forma da cobertura varia ao longo das suas seções, dividindo sua área retangular em três cúpulas, com destaque para a

central, mais alta, com 36 metros de altura (Figura 5.28b). Essa é sobreposta ao edifício existente, permitindo esconder a ligação entre os dois.

A solução proposta para a cobertura foi a criação de uma grande malha de vigas estruturais, que sofrem torção ao longo delas. Essas, além de atenderem a uma função estrutural, funcionam no controle acústico e ambiental. A torção das vigas auxilia na proteção da luz solar direta do sul e permite a entrada da luz indireta do norte. Além disso, elas são perfuradas, permitindo que o som seja absorvido pelo material acústico localizado no seu interior (Figura 5.28c).

Assim, criou-se um ambiente adequado, do ponto de vista acústico, para a realização de peças de teatro, eventos musicais ou reuniões sociais (PETERS, 2007). A estratégia usada para possibilitar às vigas incorporarem diversas funções foi aumentar a espessura delas. Quando elas se aproximam das colunas de apoio, ficam mais espessas, visando acomodar as forças estruturais nas posições das colunas (Figura 5.29a). Para cobrir a complexa superfície da cobertura com placas de vidro planas (economicamente viáveis), vários estudos foram feitos no computador (FOSTER + PARTNERS, 2011). No final, utilizou-se o mecanismo de interpolação dos apoios. Para cada placa, dois apoios têm medidas fixas e dois têm medidas variadas (Figura 5.29b).

Figura 5.29 Detalhes do projeto do SICE



Nota: a) vigas com espessuras variadas; b) encaixe das placas da cobertura

Fonte: <<http://www.fosterandpartners.com>>

5.4.3.3 Processo de Projeto: geometria e forças

Geometria

Quando as técnicas digitais foram utilizadas, um partido arquitetônico já havia sido definido, expresso em um croqui elaborado pelo arquiteto inglês Norman Foster. O modelo digital desse projeto serviu para transformar a proposta inicial, otimizando-a. Durante o processo de projeto, diversas mudanças foram feitas na superfície visando torná-la: esteticamente mais agradável; geometricamente mais eficiente; mais fácil de ser construído; e, economicamente viável.

Do ponto de vista da otimização da forma, esse projeto utilizou o princípio da forma livre (*free-form*), como meio de se chegar à forma geométrica da cobertura. Ao longo do desenvolvimento da forma, ela passa a incorporar princípios da geometria matemática simples, ou seja, formas geométricas complexas que são baseadas em geometrias matematicamente conhecidas. Essa transformação no caráter de sua geometria viabilizou sua construção.

O Quadro 5.23 sintetiza as características geométricas do processo de geração da forma da Cobertura do Smithsonian Institution Courtyard Enclosure.

Quadro 5.23 Características da geometria da cobertura

Projeto	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
Cobertura do Smithsonian Institution Courtyard Enclosure	Partido	Híbrida (forma livre + geometria matemática simples)

Fonte: Autoria própria

Forças

As forças (desempenhos) usadas no processo de transformação da forma seguiram critérios hierárquicos, de modo que umas foram mais importantes que outras. Estas foram: carga estrutural, acústica, iluminação natural e restrições do lugar. O Quadro 5.24 sintetiza as principais forças.

Quadro 5.24 Forças usadas na otimização da forma da cobertura

Projeto	Forças			
Smithsonian Institution Courtyard Enclosure	Carga estrutural	Acústica	Iluminação natural	Restrições do lugar

Fonte: Autoria própria

5.4.3.4 Processo de Projeto: técnicas e softwares

Técnicas

O Quadro 5.25 mostra que as principais técnicas de avaliação usadas foram: Análise de Elemento Finito e Análise Termal. No estágio de representação, destacam-se o uso de prototipagem e da *Geometry Method Statement*.

A programação computacional serviu como técnica de otimização de solução por meio da geração de variações nas opções de projeto. Otimizadas e representadas, as formas eram avaliadas, utilizando-se para isso ferramentas de simulação.

Quadro 5.25 Técnicas, estágios do ciclo de decisão e loops reiterativos

Técnica	Estágio ciclo decisão	Loop reiterativo com
Análise de Elemento Finito	Avaliação	Geração
Análise Termal	Avaliação	Geração
Modelagem paramétrica	Otimização, Representação	Avaliação (simulação), fabricação
<i>Geometry Method Statement</i>	Representação, Otimização	Avaliação e fabricação
Prototipagem	Representação	Avaliação
Scripting	Geração, Otimização/Desempenho, Avaliação	Geração, otimização/ desempenho, avaliação, representação

Fonte: Autoria própria

Software

No projeto substituiu-se a simples tradução do esboço do arquiteto em um programa CAD para a formulação de um ambiente de programação utilizado pelos projetistas para manipulação de geometrias complexas. O ponto inicial foi a definição do ambiente de programação. Em seguida, definiram-se os softwares para avaliação e fabricação. O Quadro 5.26 mostra os softwares usados.

Quadro 5.26 Softwares, estágios do ciclo de decisão e habilidades requeridas

Software	Estágio do ciclo de decisão	Tipo de solução	Habilidades para uso
Programa de computador em VBA para Generative Components	Geração, representação, otimização	Desenvolvido pelo escritório uso em projeto específico, associado a solução comercial de software.	Capacidade avançada de desenvolver script
Ecotect	Avaliação	Solução comercial de software	Conhecimento avançado
ODEON	Avaliação	Solução comercial de software	Conhecimento avançado
Ansys	Avaliação	Solução comercial de software	Conhecimento avançado
Computer programming in AutoLISP running in Mechanical Desktop	Fabricação	Desenvolvido pelo fabricante para um único projeto	Capacidade avançada de desenvolver script
Rhino	Fabricação	Solução comercial de software customizado	Conhecimento avançado
Geometry Method Statement	Otimização, Representação	Desenvolvido pelo escritório uso em diferentes projetos	Capacidade avançada de desenvolver script

Fonte: Autoria própria

O principal software utilizado neste trabalho desenvolveu-se pela equipe do SMG dentro do ambiente do Generative Components (GC) – Quadro 5.26. Utilizaram-se também outros softwares comerciais. Para todas as soluções, exigia-se que o usuário tivesse um conhecimento avançado no uso do aplicativo. Em alguns softwares, exigia-se avançada capacidade de desenvolver scripts.

5.4.3.5 Processo de Projeto: interoperabilidade e colaboração

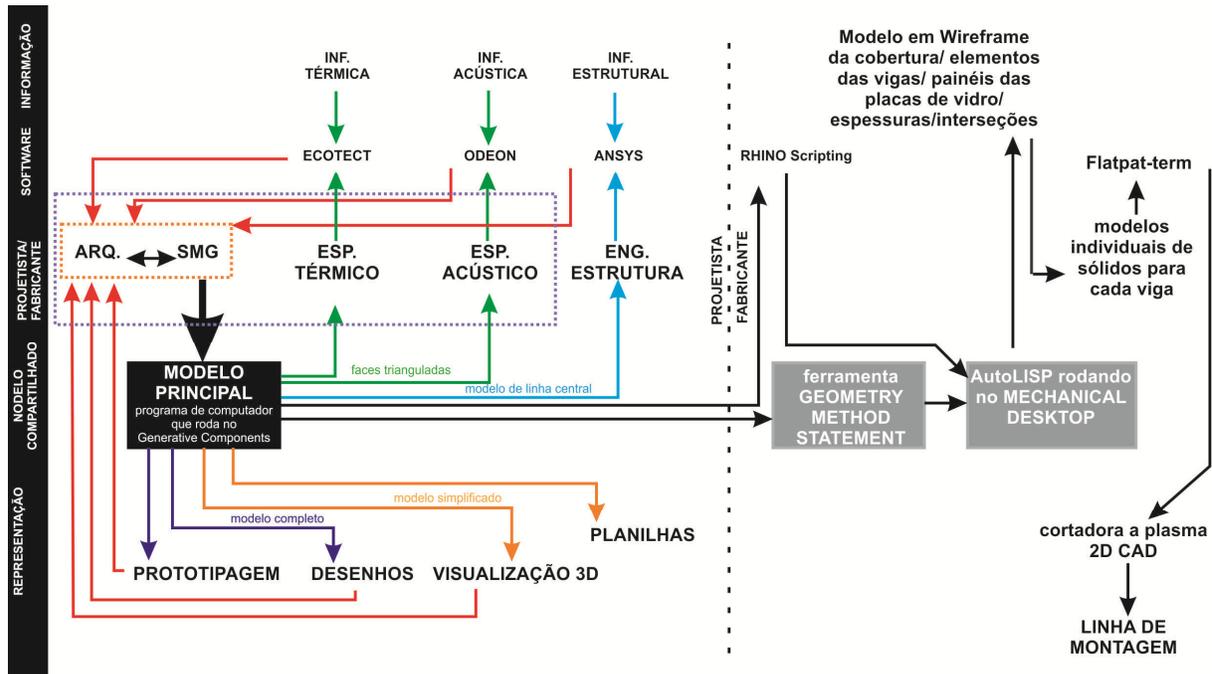
Um fator importante para o sucesso do projeto foi gerar toda a geometria utilizando-se um único programa de computador desenvolvido em VBA no GC. Esse programa desenvolveu-se em colaboração com os demais projetistas e com todos os consultores de projeto. O programa precisava ser flexível e adaptável o suficiente para lidar com diversos tipos de alterações que, porventura, poderiam ocorrer durante o processo de projeto.

O resultado é um programa de computador que serviu como um banco de dados centralizado de modelo de projeto digital, que era capaz de gerar diferentes modelos do edifício a serem utilizados por diferentes softwares de avaliação, por consultores para a realização de análises especiais, e para comunicar com softwares de fabricação digital, conforme explicação de De Kestelier (informação verbal).

Outro fator importante para o sucesso do projeto foi a estreita colaboração com as equipes de projeto, os consultores especializados, os fabricantes e construtores. O fabricante Joseph Gartner GmbH, por exemplo, trouxe para o projeto toda a experiência em fabricação de componentes em vidro e estruturas em metal. Sua participação desde as fases iniciais do processo de projeto garantiu aos projetistas estarem discutindo uma solução que fosse exequível. Embora o modelo digital não tenha sido diretamente compartilhado com Gartner, os desenhos e os métodos foram. De posse deles, Gartner desenvolveu um modelo digital próprio, utilizado na fabricação da estrutura da cobertura, por meio de um AutoLISP que rodou no Mechanical Desktop.

A Figura 5.30 mostra o esquema geral de colaboração utilizado no projeto. O "Modelo Principal" desenvolvido pelo SMG foi utilizado para extrair diferentes tipos de informação, essenciais para o processo de projeto. De acordo com o tipo de avaliação, esse modelo gerava um tipo diferente de informação. Associada ao Modelo Principal, algumas informações sobre propriedades do objeto foram incorporadas diretamente nos softwares de análise.

Figura 5.30 Esquema de colaboração e interoperabilidade empregado no projeto do SICE



Nota: As setas em verde, azul e laranja mostram diferentes tipos de informações extraídas do Modelo Principal, para serem utilizadas por diferentes profissionais

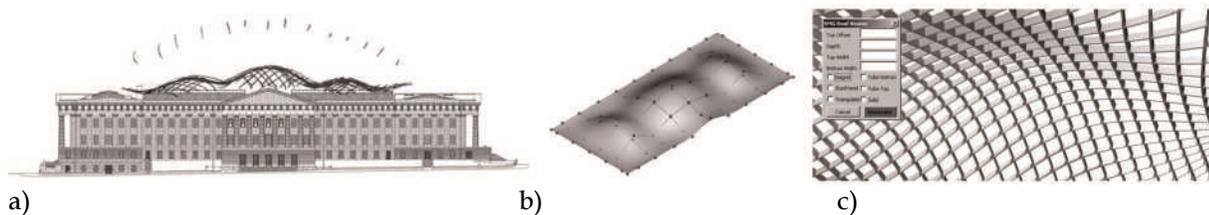
Fonte: Autoria própria

5.4.3.6 Processo de Projeto: geração da forma

O processo de geração da forma se iniciou com um esboço de Norman Foster (Figura 5.31a). Com base nesse esboço, iniciou-se o processo de transformação/ otimização com a viabilização da ideia, segundo De Kestelieer.

Em vez de simplesmente traduzir o esboço em um modelo tridimensional, partiu-se para captar os fundamentos que estavam por trás da intenção do projeto, por meio da criação de um esquema digital que pudesse ser facilmente utilizado pelos projetistas para manipular a geometria complexa. Nesse momento foi fundamental compreender os fatores que guiavam a intenção do projeto e que poderiam ser facilmente utilizados pelos projetistas para manipularem as formas complexas. Para isso, o SMG assumiu o papel de estabelecer, em colaboração com a equipe de projeto, os principais parâmetros e compreender como estes poderiam ser utilizados na transformação do modelo, sem alterar o conceito do projeto, explica De Kestelieer.

Figura 5.31 Evolução do processo de projeto



a) Nota: a) esboço da cobertura produzido por Norman Foster; b) superfície da cobertura definida por uma malha de pontos; c) software desenvolvido pelo SMG para esse projeto e usado para projetos de coberturas complexas

Fonte: Peters (2007, p. 75)

Por meio do desenvolvimento do programa de computador (em VBA), a equipe do SMG iniciou a modelagem paramétrica da forma. Um dos pontos fundamentais foi a criação de um mecanismo de controle do modelo que fosse simples e intuitivo. Para isso, iniciou-se a codificação das restrições de projeto em um sistema geométrico composto por: uma superfície que representava o projeto; uma malha de pontos associada à superfície (Figura 5.31b); uma regra de controle de força das vigas; e marcadores indicando a posição dos centros das colunas. Esse sistema geométrico serviu como insumo no GC e permitiu gerar todos os componentes estruturais e a superfície de vidro, associados a esse sistema de codificação.

Visando tornar o sistema o mais simples possível de manipular, criou-se uma superfície com o mínimo de polígonos. Com poucos pontos de controle, não só era fácil realizar os ajustes necessários na estrutura, como também se evitou a criação de uma superfície com curvaturas acentuadas, descontínuas ou irregulares, que era algo extremamente indesejável no projeto, segundo o entendimento de De Kestelier.

Por meio do modelo paramétrico e de um conjunto de valores de parâmetros, desenvolveu-se um script que criou uma série de componentes detalhados do telhado. Esse script possibilitou a associação de cada componente a uma condição local, como também que se avaliasse o desempenho dos componentes, que respondiam ao ambiente em que estavam inseridos. Com o uso de scripts como meio de projeto, obteve-se uma série de respostas rápidas e precisas que se refletiram em benefícios de projeto. Segundo Menges (2006), entre esses benefícios, destacam-se:

- Geração de múltiplas representações expressas em um modelo único: modelo de linha central (usado na avaliação estrutural); modelo de painéis planos triangulados (usado na avaliação acústica); modelo simplificado (usado na visualização); modelo de vigas

sem dobraduras (usado na prototipagem); modelo com nós e barras (usado para gerar desenhos e planilhas); modelo completo com todos os elementos da cobertura (usados na criação dos desenhos pela equipe de projeto).

- Desenvolvimento independente da configuração da cobertura e das estratégias dos elementos individualizados. Com isso, a geometria do telhado de vidro era livre para sofrer alterações sem que isso afetasse a lógica das seções das vigas ou do sistema de revestimentos. Por meio dos scripts, era possível inserir, remover ou alterar diferentes módulos de códigos para criar ou remover novas opções de telhado. Esse processo é diferente da abordagem completamente associativa, baseada numa dependência entre partes, comuns em sistemas CAD tradicionais. Assim, as mudanças no desenho eram simples e a regeneração ocorria muito rapidamente. Qualquer mudança na geometria implicava uma rápida criação de um novo modelo digital.
- Um modelo digital paramétrico com controles precisos dos valores e das relações entre os sistemas do telhado. Esse sistema produziu resultados consistentes e repetíveis, de modo que foi possível salvar o histórico do projeto, por meio da cópia dos scripts gerados e da evolução da geometria.

Pela especificidade do projeto, De Kestelier mostrou que o programa de computador desenvolvido em VBA e executado no GC foi criado gradualmente durante o projeto (Figura 5.31c). Esse programa representou a síntese das ideias de projeto. Ao longo do desenvolvimento do projeto, as especificações e restrições iam aumentando; para acompanhar isso, o programa sofreu diversas alterações e novas regras foram adicionadas. O programa foi controlado por uma série de valores de parâmetros e da geometria das superfícies de controle. Os parâmetros eram valores numéricos ou chaves com opções.

Paralelamente à construção do modelo paramétrico, várias investigações eram feitas utilizando-se ferramentas de CAD tradicionais. Uma vez que a lógica da concepção foi determinada, esta era transformada em regras que eram adicionadas em forma de algoritmo ao programa de computador. As regras utilizadas na geração da geometria da cobertura eram simples, porém os resultados finais eram de um alto nível de complexidade. A geometria de cada nó era diferente, mas regras que orientavam essa geometria eram únicas. A estrutura da

cobertura e dos painéis de vidro foi concebida adaptando-se à geometria local e à proximidade das colunas (PETERS, 2007).

Durante todo o processo de geração da forma, o SMG trabalhou com a equipe de projeto do Foster + Partners, no sentido de mostrar opções e os meios mais apropriados de descrição racional da superfície complexa. No fim do desenvolvimento da forma, chegou-se a um código descrito por mais de 5.000 linhas, com 57 parâmetros. Usando apenas a geometria como entrada, o script era capaz de gerar aproximadamente 120.000 elementos, num tempo de cerca de 15 segundos. Todo o processo de geração da forma durou seis meses; durante esse período, geraram-se mais de 415 modelos de edifício, conforme afirmou De Kestelier (informação verbal).

O uso de programas computacionais associados a técnicas de geração da forma, tornou possível estabelecer uma variedade incalculável de opções dentro do espaço de soluções. Um aspecto de suma importância nesse processo foi criar estratégia para avaliar as opções e escolher aquelas que melhor resolviam o problema de projeto.

Embora seja incorreto afirmar que o processo de projeto seguiu uma sistemática, identificaram-se alguns ciclos recorrentes, com sequência de atividades, expressos na Figura 5.32. O primeiro passo foi a definição do partido arquitetônico, com o esboço de Norman Foster, conforme já citado. Esse esboço foi transcrito em um sistema de regras e parâmetros, incrementados em algoritmos. A partir daí, representou-se a forma num modelo digital no GC, semelhando ao partido arquitetônico. Acrescentaram-se novas regras e parâmetros visando tornar a forma mais coerente.

Em seguida, fizeram-se avaliações de desempenho (estruturais, ambientais, acústicas e estéticas). Discutiram-se os resultados das avaliações, que serviram para alterar e acrescentar parâmetros e restrições, e para criar outras regras, incrementando o algoritmo utilizado no projeto. Com base nos resultados das avaliações do modelo, os projetistas estabeleciam valores numéricos de entrada de dados num programa que gerava múltiplas opções de solução (*Geometry Method Statement*), por meio da otimização da forma gerada, com base em critérios de desempenho. Representavam-se essas soluções em uma matriz de opções, facilitando o processo de escolha. Para a representação, também se utilizaram técnicas de prototipagem. Por meio da prototipagem, criaram-se modelos reduzidos e *mock-ups* na escala 1/1. Esse processo se repetia à proporção que a forma se otimizava e as soluções amadureciam.

Figura 5.32 Processo de geração da forma com indicação do início do processo e solução



Fonte: Autoria própria

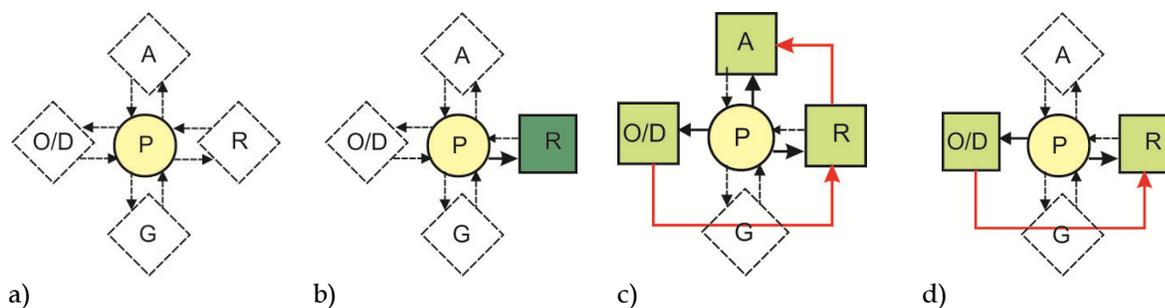
O processo de geração da forma baseou-se em tentativas e erros (*trial-and-error*). Esse processo não tem um *feedback* automatizado. De acordo com De Kestelier (informação verbal), “[...] não existia intenção de automatizar o processo de *feedback*”. Ele defende a tese de que o processo completamente automatizado pode ser válido para algumas áreas do conhecimento, mas não para a arquitetura, que conta com uma forte dosagem de subjetividade. Por outro lado, o processo de representação, otimização e avaliação apresentou ciclos automatizados durante estágios do ciclo de decisão. Esses ciclos automatizados permitiam reduzir o tempo do processo de projeto e gerar mais opções de solução.

5.4.3.7 Modelo Digital e Nível de Automação

Esse projeto usou quatro principais classes de interação e relação de projetistas e componentes do projeto digital (Figura 5.33). A primeira classe (Figura 5.33a), analógica, apareceu nos primeiros momentos do processo de projeto, quando o arquiteto esboçou o partido arquitetônico com as diretrizes gerais do projeto. Essa classe também ocorreu, de modo mais

escasso, em outros momentos do processo de projeto. A segunda classe (Figura 5.33b), já digital, ocorreu na transcrição do esboço para o GC. Na terceira classe (Figura 5.33c) os componentes avaliação, otimização/ desempenho e a representação são automatizados. Nesse caso, não existe uma ligação direta entre avaliação e otimização. Os resultados da avaliação automática serviram de insumo para os projetistas alterarem os parâmetros manualmente. Estes, com base em critérios de desempenho, otimizavam a forma. Na última classe (Figura 5.33d), a avaliação ocorria manualmente. Otimização/ desempenho e representação permaneciam automatizados.

Figura 5.33 Modelos de projeto digital utilizados no projeto da Cobertura SICE



Fonte: Autoria própria

5.4.3.8 Considerações sobre o Estudo de Caso

Esse estudo de caso, apesar de não apresentar ciclos de decisão completamente automatizados, permitiu mostrar um processo de projeto e construção completamente digital. Desde os estágios iniciais do processo de projeto até a fabricação dos componentes de construção, esse projeto utilizou um modelo único digital de informação do edifício.

Para que a otimização digital da forma, baseada no desempenho, ocorresse foi fundamental o emprego de uma modelagem paramétrica, com informações agregadas ao modelo, e que essas informações do modelo pudessem ser interoperáveis com softwares de avaliação e representação, de modo que o fluxo das informações ocorresse durante o processo de geração da forma, com o mínimo de “ruído”. Embora informações, por exemplo, propriedades dos materiais, não estivessem diretamente agregadas ao modelo digital – e, tendo de ser digitalizadas manualmente em aplicativos de avaliação –, esse caso representou um uso eficiente da interoperabilidade e da modelagem paramétrica, que se tornaram peças essenciais do processo de geração da forma. Esse é, portanto, um exemplo rico de como o *Building Information*

Modeling (BIM) pode ser empregado como suporte ao processo de geração da forma baseada no desempenho.

5.4.4 ESTUDO DE CASO 4: Rolex Learning Center, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL)

5.4.4.1 Escritório: Bollinger + Grohmann

Fundado pelos professores Klaus Bollinger e Manfred Grohmann, o escritório de engenharia Bollinger + Grohmann tem mais de vinte e oito anos de experiência em engenharia estrutural e projeto. Está sediado em Frankfurt e conta com filiais em Viena (2001), Paris (2007), Oslo e Melbourne (2010).

De acordo com Bohnenberger (informação verbal),²¹ Bollinger + Grohmann apresenta um perfil de ser multinacional, multicultural e ter um quadro de funcionários com formação variada. A empresa está conectada com todo o mundo, com parceiros em diferentes países e cidades. A equipe é composta por engenheiros estruturais, arquitetos, *building physicist*, projetistas, etc. além de contar com consultores externos e parcerias com universidades.

Imbuídos de uma visão de colaboração entre arquitetos e engenheiros, eles buscam continuamente um processo integrado. Esse processo, segundo Bollinger + Grohmann (2011), leva a soluções com qualidade estética e espacial, baseadas em uma alta qualidade e economia da construção. Por meio da colaboração, desde os primeiros estágios do projeto, o escritório Bollinger + Grohmann (2011) mostra ser possível desenvolver processos inovadores e eficientes.

²¹ Entrevista concedida pelo engenheiro Sascha Bohnenberger da Bollinger + Grohmann, em Frankfurt, 24 de fevereiro de 2011.

5.4.4.2 Projeto: Rolex Learning CenterInformações técnicas do projeto

O Quadro 5.27 apresenta a ficha técnica do projeto. O projeto se destaca pela grande dimensão horizontal.

Quadro 5.27 Informações técnicas sobre o projeto

<i>Informação</i>	<i>Descrição</i>
Nome do projeto	Rolex Learning Center (RLC), Ecole Poytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Localização	Lausanne (Suíça)
Uso	Centro de aprendizagem da escola politécnica EPFL
Característica	Estrutura em concreto do piso e laje aço cobertura
Área total	37.000 m ²
Dimensões	166,50 m X 121,50 m
Número de pisos	1 piso principal + 1 piso no subsolo
Ano do projeto	2007/2009
Status do projeto	Construído
Cliente	Ecole Poytechnique Fédérale de Lausanne
Arquiteto	SANAA - Kazuyo Sejima + Ryue Nishizawa
Engenheiro estrutural	Bollinger + Grohmann
Conceito estrutural	SAPS/ Sasaki Partners

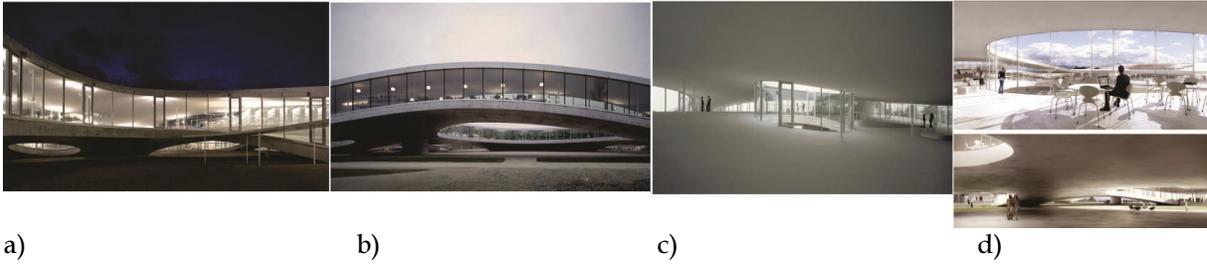
Fonte: Autoria própria

Descrição do edifício

Construído no centro do câmpus da École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), o Rolex Learning Center (RLC) funciona como um laboratório de aprendizagem, uma biblioteca e um centro cultural internacional da EPFL. O edifício oferece uma ampla lista de serviços, desde biblioteca, espaços de convívio, restaurante, café, livraria, intercalados entre espaços abertos e fechados (ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÈDÉRALE DE LAUSANNE, 2010).

O RLC constitui-se por uma estrutura contínua, retangular, espalhada numa área de 22.000 metros quadrados. Em razão da permeabilidade e forma ondulada do piso e teto, o edifício aparenta ser bastante orgânico. A conectividade dos espaços, a desproporção entre a dimensão do corte e da planta e o número reduzido de apoios visíveis aumentam a amplitude do espaço e a variedade de sensação espacial (Figura 5.34). A altura máxima do edifício é de 10 metros acima do nível do solo. O desnível máximo da casca alcança os 5 metros.

Figura 5.34 Vistas do Rolex Learning Center



a) fluidez estrutural; b) a forma parece flutuar no espaço; c) espaços abertos internamente; d) imagem digital apresentada no concurso mostrando a fluidez do espaço interno

Fonte: <<http://www.frameandform.com/2010/03/15/epfl-rolex-learning-center/>>.

Entre um grande espaço interconectado, existem pátios externos, ocupados por jardins e mobiliário, de modo a proporcionar relaxamento ao ar livre para visitantes e alunos. O edifício constitui-se de uma superfície ondulada que se levanta ao longo de cada um de seus lados, marcando o programa, as visuais, as áreas e a entrada (ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2010).

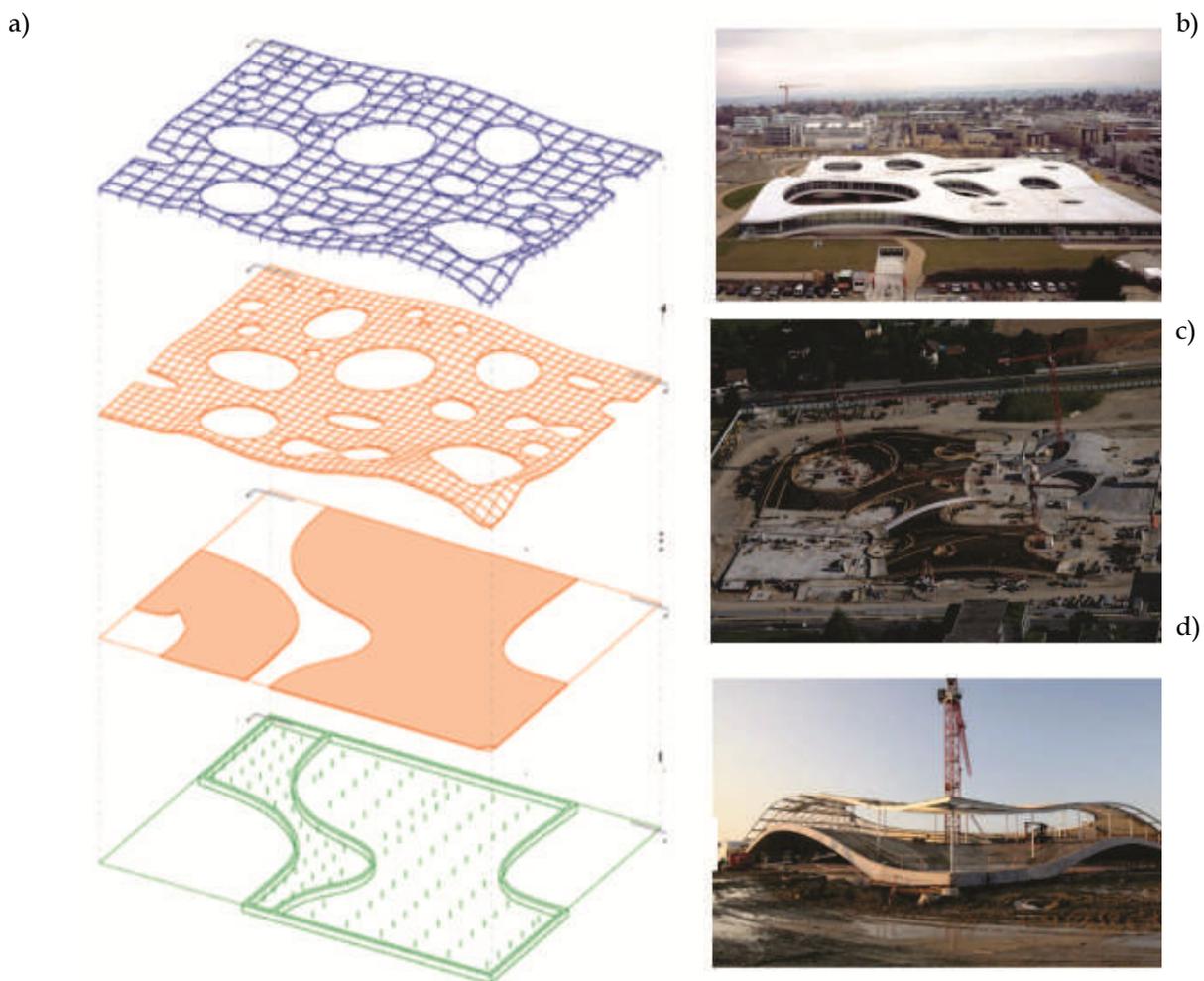
Do ponto de vista da distribuição dos espaços, a estrutura do edifício substitui a tradicional forma de compartimentação que emprega paredes ou divisórias. Por meio de um espaço ondulado, criam-se “colinas”, “montes” e “vales” sem uma definição clara de limite nem barreiras entre áreas. A oscilação nas curvas de nível interna substitui as escadas e rampas. Além disso, as oscilações delimitam os usos, as zonas de ruído, os espaços sem a necessidade de barreiras físicas.

A topografia dos planos que compõem o edifício apresenta uma fluidez que é interrompida apenas por 14 vazios na estrutura (Figura 5.35a, b). Nesses vazios (pátios) se localizam os acessos do edifício, delimitados por cortinas de vidro. Nas áreas mais elevadas da topografia, é possível avistar diferentes pontos de vista do câmpus e também o lago de Genebra e os Alpes.

A parte principal do edifício se constitui de duas cascas paralelas que formam a estrutura do piso e da cobertura. Duas outras camadas formam o substrato das duas superfícies curvas (Figura 5.35a). O piso é o principal elemento estrutural do edifício, e se constitui de uma estrutura de concreto. A cobertura se apoia no piso de concreto por delgados pilares (Figura 5.35d), o qual é constituído por uma estrutura de aço e madeira.

O partido arquitetônico do RLC apresenta características bem diferentes de outros projetos, o que tornou o processo de geração e otimização da forma algo único: geometria não convencional; utiliza uma casca como piso em vez de cobertura; apresenta um programa arquitetônico variado, com cargas diferenciadas na estrutura; a superfície da casca necessita ser inclinada suficientemente a ponto de permitir cadeirantes se locomoverem pelo edifício; a superfície respeita alguns eixos visuais e certas proporções, visando evitar a sensação de estar num túnel; e a estrutura comporta diversos vazios (ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÈDÉRALE DE LAUSANNE, 2010).

Figura 5.35 Distribuição das Camadas do Rolex Learning Center



Nota: a) a camada mais alta (de cima para baixo) é uma estrutura em aço, a segunda camada é a casca em concreto, a terceira é uma laje plana e a última é a laje de substrato; b) implantação do edifício, com destaque para a estrutura em aço; c) estrutura com destaque dos arcos; d) vista da construção da camada em aço apoiada na camada em concreto.

Fonte: a) Sasaki (2005, p. 168); b, c, d <<http://www.frameandform.com/2010/03/15/epfl-rolex-learning-center/>>

5.4.4.3 Processo de Projeto: geometria e forças

Geometria

O processo de projeto digital constituiu-se pela otimização de um partido arquitetônico. Em vez de se basear no princípio de “encontrar a forma”, foi regrado por restrições físicas da estrutura e parâmetros embutidos no partido arquitetônico apresentado pelo SAANA.

O Quadro 5.28 sintetiza as características geométricas. No que diz respeito às categorias geométricas usadas na otimização da forma, o processo clássico de encontrar a forma (*form finding*) foi transformado num processo de Otimização de Pareto (GROHMANN *et al.*, 2009) chamado de método de Análise Sensitiva (*Sentitive Analysis method*).

Quadro 5.28 Características da geometria do edifício

Projeto	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
Rolex Learning Center	Partido	Encontrar a forma (Otimização de Pareto)

Fonte: Autoria própria

Forças

As forças usadas para determinar a forma final da superfície da casca (Figura 5.29), foram de dois tipos: estruturais e programáticas. As estruturais foram empregadas diretamente nos programas de análise estrutural. As programáticas foram de três tipos: layout (relacionada com o programa de necessidades), movimento (deixar as curvas mais suaves, no percurso, evitar a colocação de colunas, de modo a deixar o movimento mais fluido) e perspectiva do lugar (adaptar a superfície curva de modo a privilegiar as visuais). Estas forças entraram no sistema em forma de parâmetros e regras.

Quadro 5.29 Forças-guia no processo transformação da forma do edifício

Projeto	Forças		
Rolex Learning Center	Carga estrutural	Programa	Perspectiva do lugar

Fonte: Autoria própria

5.4.4.4 Processo de Projeto: técnicas e softwaresTécnicas

As principais técnicas utilizadas no processo de geração da forma foram Análise de Elemento Finito (FEA) associado à Análise Sensitiva, modelagem paramétrica e prototipagem (Quadro 5.30). Utilizaram-se o FEA nos estágios de Avaliação da superfície, a modelagem paramétrica nos diferentes estágios de decisão (Otimização/Desempenho, Representação e Geração da forma); e a prototipagem, utilizada como técnica de Representação. Esta foi essencial, principalmente para os arquitetos visualizarem a superfície e discutirem alterações, durante o processo de geração da forma.

Quadro 5.30 Técnicas, estágios do ciclo de decisão e estágio em que o loop interage

Técnica	Estágio ciclo decisão	Loop reiterativo com
Análise de Elemento Finito	Avaliação	Geração
Modelagem paramétrica	Geração, Representação, Otimização/Desempenho	Avaliação, geração, representação
Prototipagem	Representação, Geração	Geração, Avaliação
Análise Sensitiva	Geração, otimização/ desempenho	representação
Scripting	Geração, otimização/ desempenho, avaliação	Geração, otimização/ desempenho, avaliação, representação

Fonte: Autoria própria

Software

Para o cálculo da superfície em casca de concreto, utilizou-se o Sofistic, pois é o software utilizado pelo escritório. Para a cobertura, utilizou-se o RSTAB. Em termos de geração da forma, eles trabalharam somente com o Rhino associado ao Rhino script, esclarece Bohnenberger (informação verbal). Além dessas ferramentas comerciais, utilizaram-se alguns programas feitos sob medida (em *Visual Basic* para os aplicativos). Estes foram usados basicamente como interface de dados para tarefas automatizadas, tais como tecelagem da superfície (SCHEIN; TESSMANN, 2009, p. 24).

Os principais softwares utilizados no processo de geração da forma foram: o Rhino associado ao Sofistic, para a criação da forma da casca em concreto; o Rhino e o RSTAB, para o cálculo da cobertura; o Rhino associado ao Vectorworks, para a geração dos desenhos; o Sofistic

e RSTAB para otimização. O Quadro 5.31 descreve os softwares, os estágios do ciclo de decisão em que foram utilizados o tipo de solução e habilidade requerida.

Quadro 5.31 Software utilizados na fase de transformação da forma

Software	Estágio do ciclo de decisão	Tipo de solução	Habilidades para uso
Rhino 3D +SOFISTIC	Otimização,avaliação	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
Rhino 3D +RSTAB	Otimização, avaliação	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
Rhino 3D /Vectorworks (Niemetschek)	Representação	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
SOFISTIC	Otimização/ desempenho	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
RSTAB	Otimização/ desempenho	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script

Fonte: Autoria própria

Em todas as soluções, os softwares foram customizados. Com base no Rhino, o escritório Bollinger + Grohmann desenvolveu vários ambientes de scripts. Esses ambientes tinham o objetivo de automatizar o processo de geração da forma. Em todas as situações, era necessária uma capacidade avançada em desenvolvimento de scrips.

5.4.4.5 Processo de Projeto: interoperabilidade e colaboração

Interoperabilidade

A interoperabilidade entre os escritórios de engenharia e arquitetura durante a concepção da forma foi baixa. Os arquitetos do SANAA, por exemplo, trabalharam basicamente com o protótipo em escala reduzida. As principais discussões entre as equipes de arquitetura e engenharia ocorriam em cima das maquetes e esboços. Quando novas formas iam surgindo, novas maquetes iam sendo confeccionadas. Baseado nessas maquetes, o escritório de Bollinger + Grohmann desenvolvia os modelos e os otimizava. Dentro do escritório de engenharia, a interoperabilidade precisava ser alta o suficiente para permitir a passagem de informações entre diferentes soluções nos estágios de avaliação, otimização e representação.

Segundo Bohnenberger (informação verbal), no desenvolvimento dos projetos de arquitetura e engenharia, utilizaram-se sistemas com maior nível de interoperabilidade. Nesse

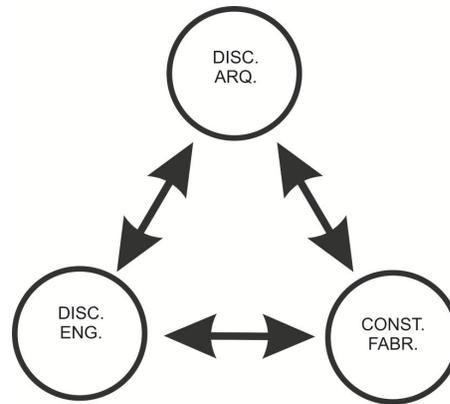
estágio, menos pessoas e com mais experiência em computação participavam do trabalho. Durante o projeto, para a construção, foi necessário um alto nível de interoperabilidade visando a troca de informações entre diferentes disciplinas num curto intervalo de tempo. No escritório Bollinger + Grohmann desenvolveram-se meios para aumentar essa interoperabilidade. Mesmo assim, em algumas situações, foram necessárias reconstruções no modelo para se adaptar a um ou outro software. Entre os formatos de arquivos mais empregados, nesse projeto, Bohnenberger destaca os seguintes: 3DM; pdf; xls; dxf; dwg. Formatos abertos, como o IFC não foram usados.

Colaboração

Em termos de envolvimento das equipes, o processo de projeto e construção do RLC foi essencialmente colaborativo. De acordo com Bohnenberger, foi um processo que se realizou de modo triangular: arquitetos em um vértice, engenheiros em outro e construtores e fabricantes num terceiro (Figura 5.36). De acordo com o nível de desenvolvimento do projeto, a colaboração ocorria de modo mais intenso em uma ou outra aresta do triângulo. Ao mesmo tempo, dependendo do estágio do processo de projeto e construção, existia uma coordenação, de modo piramidal, em que um membro coordenava e advertia os membros das partes inferiores da pirâmide, e eram advertidos por esses membros, que voltavam e mudavam algum procedimento.

Do ponto de vista da modelagem, graças a uma geometria não usual, a colaboração foi um fator primordial para o sucesso do projeto do RLC. Durante todo o processo de geração da forma e desenvolvimento do projeto, desenvolveu-se mais de uma geometria: a geometria do projeto arquitetônico, a geometria da estrutura, a geometria da casca em concreto e a geometria do telhado. Ambos os modelos geométricos, arquitetônicos e estruturais, desenvolveram-se em paralelo e serviram como base para o planejamento e execução da obra (WEILANDT *et al.*, 2009).

Figura 5.36 Estreita colaboração entre as disciplinas de arquitetura, engenharia e construção/fabricação



Fonte: Autoria própria

A execução desse projeto só foi possível graças a uma colaboração estreita e bem-sucedida de todos os participantes do projeto, incluindo os fabricantes e as empresas de execução. Desse modo foi possível resolver problemas incomuns com soluções eficientes (WEILANDT *et al.*, 2009).

No projeto do RLC, por ser fundamentado numa solução incomum, era difícil definir que tipo de informação seria necessária compartilhar entre os envolvidos com o projeto e a construção. Graças à estreita colaboração entre os contratadores e as equipes de planejamento e projeto, definiram-se com precisão as informações necessárias para execução, conforme comentou Weilandt (informação verbal).²²

5.4.4.6 Processo de Projeto: método

O projeto do RLC deparou-se com uma situação diferente dos processos de “como encontrar a forma” (*form finding*) tradicionais. Conforme opina Sasaki (2005), a situação desejada seria que o computador pudesse ser utilizado para aplicação da teoria mecânica baseada na matemática visando gerar perfis estruturais para a análise da forma de um edifício, refletindo um problema tipicamente não linear. Como esse projeto caracterizava-se por um caso de forma

²² Entrevista concedida pela engenheira Agnes Weilandt da Bollinger + Grohmann, em Frankfurt, 25 fevereiro de 2011.

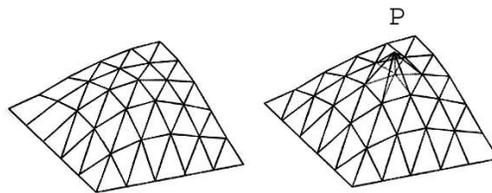
sem precedente na natureza (superfície preconcebida), precisou sofrer uma análise técnica rigorosa, baseada em suas características mecânicas específicas (SASAKI, 2008).

Sasaki (2005), então, propôs um procedimento para a criação de uma estrutura que estivesse de acordo com uma forma previamente desejada, seguindo princípios mecânicos. O processo se deu por meio da mecânica estrutural baseada no princípio da análise reversa (SASAKI, 2005), que é oposto à abordagem sequencial da análise estrutural convencional.

Baseado nesse princípio, empregou-se o método de otimização, chamado de Método de Análise Sensitiva (*Sentitive Analysis Method*). É um método de otimização da forma para a geração de cascas curvas; nele as estruturas de casas se idealizam em um estado de mínima tensão e deformação. A energia de deformação mínima na estrutura é a condição mecânica ideal. De modo inverso, a estrutura da casca ideal obtém-se pela busca da forma da superfície curva que gera a mínima energia de deformação na estrutura (SASAKI, 2008).

O algoritmo utilizado é dado por uma equação que procura diferenciar a referente variável da energia de deformação pelos parâmetros de altura de projeto. Assim, quando um nó específico é ligeiramente alterado, os efeitos sobre toda a estrutura são examinados (Figura 5.37). O coeficiente diferencial que expressa mecanicamente o grau de mudança é o Coeficiente Sensitivo (*Sensitivity Coefficient*), e ao procurar o coeficiente de sensibilidade de todos os nós e o gradiente de mudança na energia da deformação, por meio da checagem do aumento ou diminuição da deformação, pode-se chegar à otimização com a revisão do valor da altura Z na direção que vai reduzir a energia de deformação (SASAKI, 2005).

Figura 5.37 O coeficiente sensitivo foca transição da energia de deformação durante a transformação de um nó (P), considerando uma estrutura composta por "n" elementos



Nota: . A partir de uma fórmula da tensão média da estrutura, nos casos em que ocorre um crescimento na tensão com a transformação do nó P, baixa-se a coordenada Z ; quando há a diminuição, aumenta-se essa coordenada Z do ponto P

Fonte: Sasaki (2008, p. 73)

Recalculam-se os parâmetros utilizando-se Análise de Elementos Finitos, e a energia de tensão gradualmente se reduz à medida que a forma da curva vai evoluindo. O critério usado para julgar se uma situação é satisfatória é quando as convergências ocorrerem em estado no qual não existe mudança significativa na energia de tensão depois de um passo evolucionário (SASAKI, 2005).

5.4.4.7 Processo de Projeto: geração da forma

O processo de geração da forma do RLC iniciou-se pela criação de um modelo conceitual, um partido arquitetônico apresentado pelos arquitetos do SANAA ao escritório Bollinger + Grohmann (Figura 5.38). O modelo conceitual continha a intenção espacial dos arquitetos, expressa nos principais elementos do projeto. A morfologia ainda era bastante preliminar. Com base nesta maquete, arquitetos e engenheiros começam a discutir a forma do edifício.

Arquitetos e engenheiros se reuniram em diversos *workshops*. Este processo de trabalho, segundo narra Bohnenberger, é o meio empregado por SANAA para projetar. Em virtude da habilidade dos arquitetos do SANAA em trabalhar com maquetes físicas tridimensionais, as discussões e alterações iniciais se deram em cima de maquete física (Figura 5.38). O passo consecutivo foi digitalizar todo o modelo. Em seguida, os projetistas definiram parâmetros e restrições do projeto, transcritos em um script que gerou um modelo parametrizado em 3D. Visando melhorar o desempenho estrutural da forma, em termos de distribuição de cargas na estrutura, utilização do mínimo de colunas e suavização da superfície, ela foi submetida a um programa de Análise de Elemento Finita. Os resultados alimentavam automaticamente os modelos parametrizados que iam alterando a forma. Ela era novamente avaliada. Por meio de diversos passos evolucionários, chegou-se a superfícies mais eficientes e mais bem descritas matematicamente.

Figura 5.38 Maquete do partido arquitetônico do Rolex Learning Center apresentado pelo escritório SANAA ao escritório Bollinger + Grohmann



Fonte: Grohmann et al. (2009, p. 655)

No fim, o que se pode observar é que o processo de geração da forma se deu por meio de três diferentes níveis, conforme expôs Bohnenberger (informação verbal):

- modelagem conceitual, discussão sobre programa, vistas, orientações do edifício;
- os componentes estruturais e sua influência na forma;
- a racionalização da superfície, de modo a tornar mais macia e contínua.

Durante a otimização da forma do RLC, empregou-se uma estratégia denominada de “superfície de projeto” (“*design surface*”). Esta baseou-se na utilização de uma superfície bidimensional associada a uma geometria secundária, representando a terceira dimensão do componente do edifício (SCHEIN; TESSMANN, 2009). A “*superfície de projeto*” foi usada para gerar uma malha de elementos estruturais ao longo da geometria da superfície da casca. Assim, foi possível alterar a flexão dos membros da malha de modo a melhorar a forma da superfície e seu desempenho (SCHEIN, TESSMANN, 2009).

Segundo Schein e Tessmann (2009), o processo de otimização da forma consistiu-se nas seguintes partes (Figura 5.39):

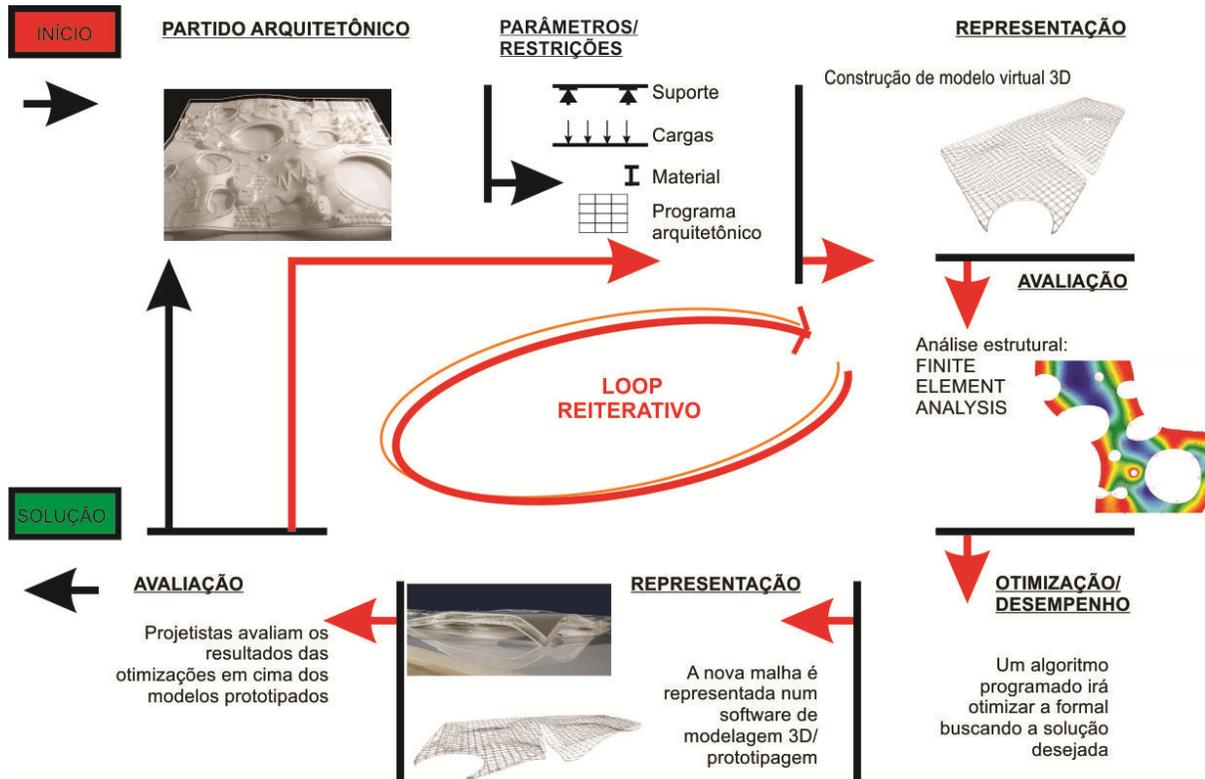
- criação de uma superfície que incorpora a ideia do projeto arquitetônico, baseada na maquete conceitual apresentada ao escritório Bollinger + Grohmann pelo SANAA;
- associada a essa superfície, definiu-se uma série de parâmetros e restrições em software (suporte, carga, material, programa arquitetônico);

- essa superfície inicial se traduz em malhas, que são expostas a intensa carga em um software de análise estrutural;
- as deflexões resultantes se alimentam de volta em um algoritmo que conduz as reações apropriadas para os locais de tensão e deformação; a superfície inicial é otimizada buscando a forma desejada, embora ainda contenha a essência da forma arquitetônica inicial;
- os dados da análise estrutural, que foram resultado do novo *feedback loop*, finalmente são usados para gerar a malha estrutural desejada de modo simplificado, mas conduzida de maneira paramétrica;
- a nova malha estrutural se transforma em superfície única no software de modelagem 3D.

A superfície otimizada supostamente incorpora uma melhoria estrutural, porque toda a forma era comunicada por dados de análise estrutural. Para provar isso, a forma inicial e a transformada eram comparadas em um software FEA. Os resultados mostraram uma redução significativa na deformação das áreas de arcos, que levaram também a um melhor abaulamento entre os apoios (Figura 5.40).

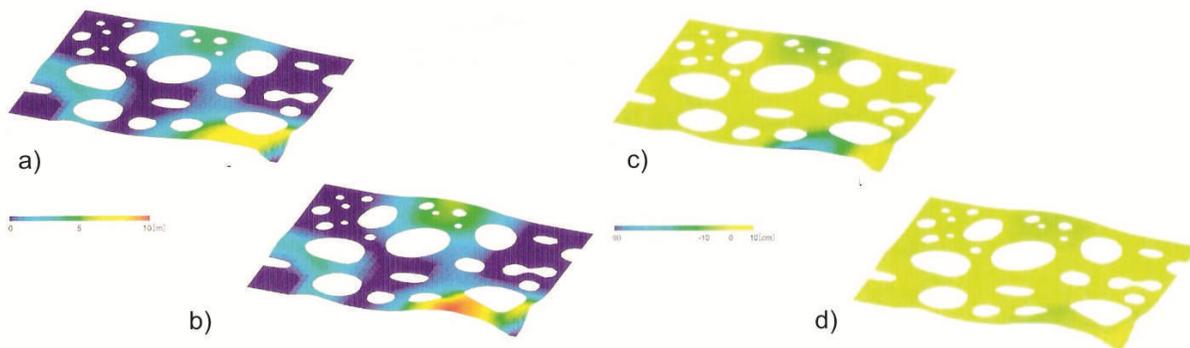
A superfície melhorada ainda incorporava a morfologia da superfície inicial, que foi guiada por parâmetros arquitetônicos de projeto. Ao mesmo tempo, a forma foi ligeiramente deformada e adaptada a tensões internas e desvios. A análise estrutural tornou-se um guia para a otimização da geometria do edifício. A interação da geometria da superfície com a topologia da malha pôde ser analisada instantaneamente por meio de interfaces fornecidas entre os dois pacotes dos softwares. Um *feedback* instantâneo de otimização, representação e avaliação foi instalado.

Figura 5.39 Processo de transformação da forma usado no Rolex Learning Center



Fonte: Autoria própria

Figura 5.40 Uso de Método de Análise Finita, reduzindo: a, c) superfície original; b, d) superfície melhorada.

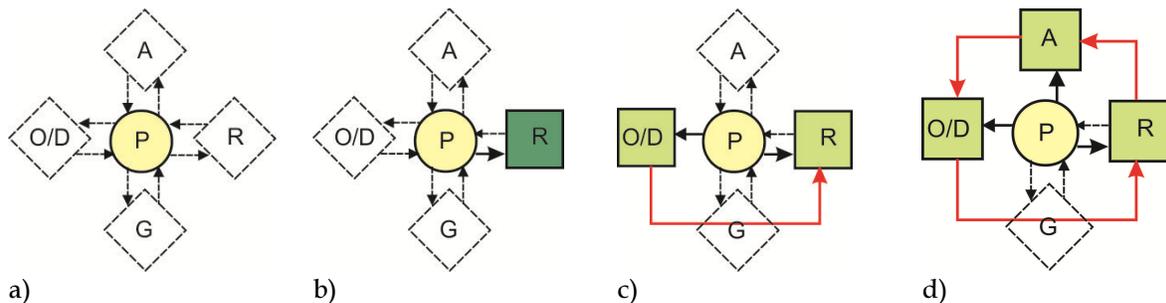


Fonte: Sasaki (2005, p.170)

5.4.4.9 Modelo Digital e Nível de Automação

O processo de geração da forma caracterizou-se por quatro principais classes de interação e relação de projetistas e componentes do projeto digital (Figura 5.41). A primeira (Figura 5.41a), analógica, apareceu nos primeiros momentos do processo de projeto, quando os arquitetos construíram uma maquete representando um partido arquitetônico e apresentaram ao escritório de engenharia. Essa classe também ocorreu em diversos outros estágios do processo de projeto e foi um dos meios de discussão e colaboração entre engenheiros e arquitetos. A segunda (Figura 5.41b) ocorreu quando a maquete foi digitalizada no Rhino. A terceira (Figura 5.41c), quando os projetistas avaliavam empiricamente nas maquetes questões estéticas e funcionais do projeto e interagiam com mecanismos computacionais que otimizava a forma. Nesses casos, existia um vínculo direto entre otimização/ desempenho e representação; avaliação era ainda um processo analógico. A quarta classe (Figura 5.41d) se deu quando o processo de avaliação também era automatizado e os dados da avaliação eram transferidos diretamente para ferramentas de otimização. Nesse caso, existia um vínculo direto entre os estágios de representação, avaliação e otimização.

Figura 5.41 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma do edifício



Fonte: Autoria própria

Observou-se que o processo de geração da forma do RLC combinou sequências de decisões manuais com sequências semiautomatizadas. Segundo informou Bohnenberger, houve o uso de técnicas manuais pelos arquitetos do SANAA, pois eles trabalhavam essencialmente com modelos físicos. O uso de técnicas semiautomatizadas foram fundamentais para o processo de otimização, transferindo informações dos softwares de avaliação para as ferramentas de otimização/desempenho. Por meio do uso de diferentes ciclos, com diferentes níveis de

automatização, foi possível trabalhar colaborativamente com diferentes projetistas, com níveis variados de conhecimento.

5.4.5 ESTUDO DE CASO 5: primeiro piso da Torre Eiffel

5.4.5.1 Escritório: RFR

Fundado em 1982 por Peter Rice, o RFR é uma empresa especializada no projeto de estruturas complexas e sofisticados invólucros de edifícios. Desde a sua fundação tem-se destacado por participar de projetos ousados em diferentes partes do mundo. A ampla gama de especialidades em seu corpo técnico, composto por arquitetos, engenheiros, designers industriais, etc., possibilita resolver problemas nos mais diversos contextos. Sua expertise vai além das técnicas em si, buscando a criação de estruturas que sejam elegantes, de modo a conciliar aspectos arquitetônicos e de engenharia (RFR, 2010a). Atualmente tem filiais em Stuttgart, Alemanha; Xangai, China; Abu Dhabi; Emirados Árabes (RFR, 2010a).

O trabalho do RFR se fundamenta no domínio de ferramentas computacionais e conceitos científicos. Por meio de avançados softwares e exploração das tecnologias mais recentes, a empresa é capaz de desenvolver soluções de projeto que sejam rigorosas, inovadoras e eficientes (RFR, 2010a). O escritório RFR tem na sua grade de funcionários especialistas em diversas áreas, por exemplo, em projetos de geometrias complexas e na escrita de algoritmos numéricos (RFR, 2010b).

Durante o processo de projet, o RFR utiliza diversos métodos e técnicas de geração e transformação da forma visando adaptar melhor o edifício às diretrizes projetuais. Entre as técnicas utilizadas, destacam-se: técnicas de geração de geometria; cálculo não linear; análise cinemática; encontrar a forma; flambagem; estudo de exposição solar; comportamento dinâmico; montagem de simulação; simulação da construção; simulação de uso.

Entre as especialidades do RFR, destacam-se: estruturas leves; estruturas de objetos; construção de estruturas; fachadas; geometrias complexas; conforto energético. Essas especialidades se organizam em três principais departamentos: passarelas e pontes, estruturas e fachadas. A criação de fachada leva em consideração os aspectos arquitetônicos, estruturais, de

segurança e o conforto, em termos de iluminação, controle de poluição, controle climático, controle do consumo de energia (RFR, 2010c).

O quadro de funcionários da RFR conta com uma equipe multidisciplinar composta por engenheiros, arquitetos e engenheiros-arquitetos. Segundo Leduc (informação verbal),²³ a presença do arquiteto é muito importante, pois estabelece a comunicação entre escritório de engenharia e de arquitetura. Dos poucos funcionários que desenvolvem scripts, todas eles são arquitetos ou engenheiros. Essa formação é importante pois, segundo Leduc, quando engenheiros e arquitetos desenvolvem script, eles o fazem de um modo mais próximo da realidade da construção.

5.4.5.2 Projeto: Primeiro Piso da Torre Eiffel (PPTE)

Informações técnicas do projeto

No Quadro 5.32, apresenta-se a ficha técnica do projeto. Nele observa-se que o projeto em questão trata-se de uma intervenção de pequeno porte.

Quadro 5.32 Informações técnicas do Projeto do Primeiro Piso da Torre Eiffel

<i>Informação</i>	<i>Descrição</i>
Nome do projeto	Primeiro Piso da Torre Eiffel (PPTE)
Localização	Paris (França)
Características	Projeto das fachadas dos edifícios localizadas no primeiro piso da Torre Eiffel
Área remodelada	4.586 m ²
Área total do primeiro andar	5.420 m ²
Número de pisos	1
Ano do projeto/ construção	2010/2013
Status do projeto	Em projeto
Cliente	Société d'exploitation de la tour Eiffel (SETE).
Arquiteto	Agência Moatti & Rivière
Engenheiro estrutural	RFR
Construção	Bateg

Fonte: Autoria própria

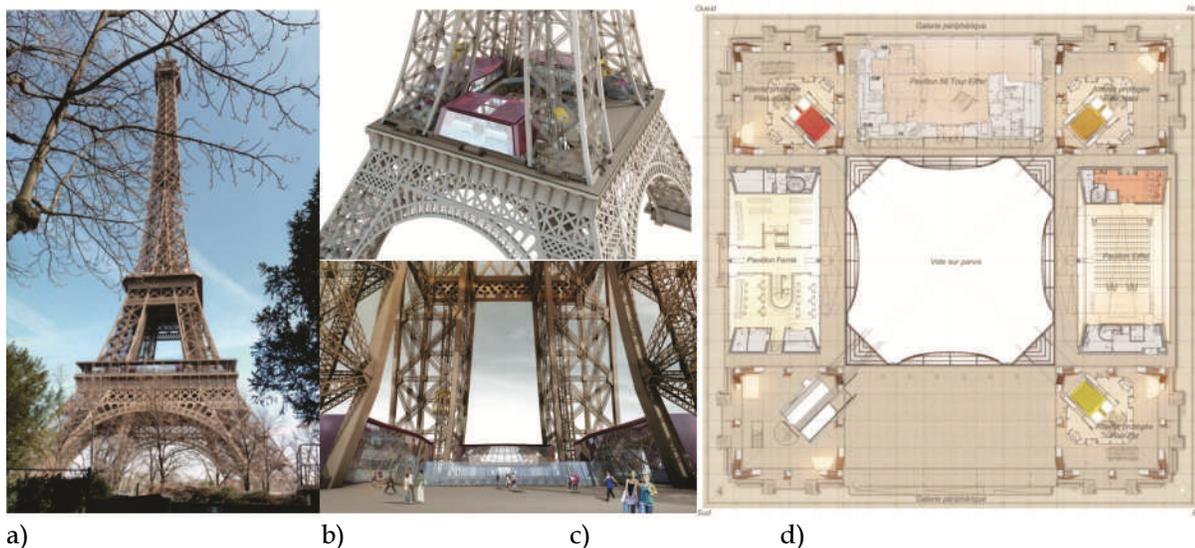
²³ Entrevista concedida pelo engenheiro- arquiteto Nicolas Leduc, do RFR em Paris, 21 de fevereiro de 2011.

Descrição do edifício

O projeto em questão consiste na remodelação do primeiro piso da Torre Eiffel (Figura 5.42a, b). Essa área conta hoje em 2011 com pavilhões e espaços públicos reformados na década de 1980, já obsoletos e não atendendo à demanda de visitantes, em ascensão, e as normas de segurança (KLEIBER, 2011). Visando reorganizar esse piso, o projeto propõe: reconstrução das salas de recepção e conferência; reconstrução do pavilhão destinado a serviços a visitantes, com restaurantes e lojas; criação de caminhos "museográficos" destinados ao entretenimento e à educação; criação de duas atrações especiais: "descobrimo espaço no monumento" e a criação de pisos e peitoris envidraçados, criando a sensação de flutuar no edifício (Figura 5.42, d). A ideia é tornar esse andar mais atrativo e chamar a atenção do público que concentra suas visitas nos dois pavimentos mais elevados.

O projeto se ancora em três conceitos principais: transparência, geometria curva, em forma oblíqua acentuada por diagonais e vazios (CHESSA, 2011). Esses conceitos visam proporcionar aos visitantes uma experiência melhorada da Torre e de Paris, valorizando o monumento e a história.

Figura 5.42 Imagens da Torre Eiffel com a inserção do novo edifício no primeiro piso

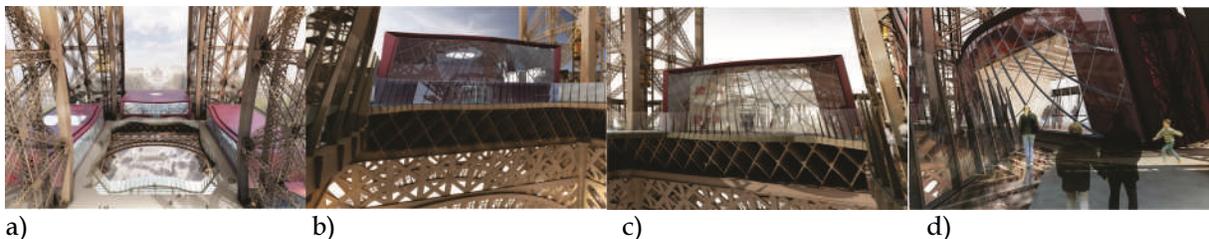


Nota: a) perspectiva da Torre Eiffel; b) destaque do primeiro pavimento com a locação dos novos edifícios em vermelho; c) área de passeio destinada ao público localizada no primeiro andar da torre; d) planta com a indicação dos três blocos

Fonte: Agence Moatti-Rivière (2011)

O projeto em si constitui-se por três pavilhões, que têm suas formas influenciadas pelos pilares, abraçando-os e acompanhando suas inclinações (Figura 5.43a construção em vermelho). As áreas técnicas localizam-se sob os pilares, visando preservar a transparências dos três pavilhões. O piso incorpora elementos de uma experiência urbana, marcando os espaços das ruas, edifícios, e direcionando o público para as visuais (Figura 5.43d). A ideia do projeto é incitar as pessoas a explorarem a Torre, associada a uma experiência lúdica e sensorial, numa viagem de sentidos e conhecimento (KLEIBER, 2011).

Figura 5.43 Imagens do primeiro pavimento da Torre Eiffel

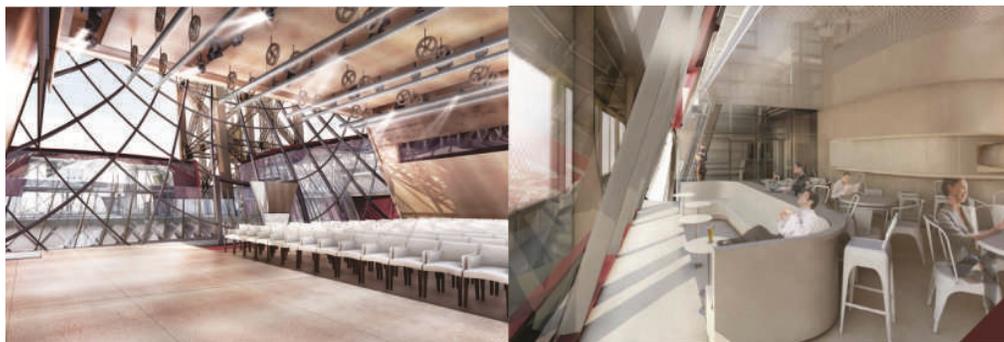


Nota: a) localização dos três blocos em vermelho entre os pilares da Torre Eiffel; b) vista do vazio com o bloco central ao fundo; c, d) vista do bloco com destaque da fachada de vidro com sua forma curva

Fonte: Agence Moatti-Rivière (2011)

O projeto incorpora alguns conceitos relacionados com a sustentabilidade, por exemplo, a redução da pegada de carbono e a universalização da acessibilidade. No novo projeto, todos os visitantes, independentemente da deficiência, terão acesso a todos os espaços. Visando aumentar o desempenho energético do edifício, utilizar-se-ão várias técnicas, por exemplo, uso da energia solar para aquecimento, energia do vento, retratamento das águas pluviais, uso de LED na iluminação (KLEIBER, 2011).

Figura 5.44 Vista interna dos blocos



Nota: a) destaque para a fachada curva de vidro; b) ambiente interno fluido

Fonte: Agence Moatti-Rivière (2011)

Os elementos principais dos três blocos são os panos de vidro das fachadas, definidos por uma curvatura complexa, que faz alusão à estrutura da Torre Eiffel, dá transparência e leveza aos novos edifícios, permitindo dialogar com a Torre (Figura 5.44a). Apresentam-se como algo novo, sem concorrer formalmente com o edifício histórico. Os panos de vidro dos três novos blocos tiveram suas formas concebidas coletivamente e serão discutidos neste trabalho.

5.4.5.3 Processo de Projeto: geometria e forças

Este estudo de caso compreende o projeto das fachadas do primeiro piso da Torre Eiffel.

Geometria

O processo de geração da forma ocorreu baseado num partido arquitetônico. Embora discussões tenham ocorrido desde os primeiros riscos, a forma inicial do projeto foi concebida na mente dos arquitetos. Partindo-se dessa forma, começou-se um trabalho colaborativo de aperfeiçoar e melhorar sua geometria visando torná-la esteticamente mais agradável e exequível para sua construção.

Do ponto de vista geométrico, a otimização da forma da fachada do PPTE baseou-se em dois processos de geração da forma. Num primeiro momento, os arquitetos criaram uma forma arquitetônica livre (*architectural free form*). Nesse caso, o processo de geração da forma realizou-se livre de restrições físicas ou limitações geométricas. Num segundo momento, os escritórios de engenharia e arquitetura desenvolveram um modelo paramétrico. Nessa fase, utilizou-se um processo de encontrar a forma (*form-finding*). Nesse momento, concebeu-se o processo de geração da forma numa superfície mínima baseada na geometria e em restrições técnicas. Basicamente foi um processo que levou em conta os aspectos geométricos, detalhes e o processo de fabricação. Segundo Leduc, o aspecto mais importante para esse projeto foi a viabilidade na manufatura. A viabilidade de fabricação é, pois, o principal componente considerado durante o processo de encontrar a forma. No Quadro 5.33, sintetizam-se as características geométricas do processo de geração da forma das fachadas do PPTE.

Quadro 5.33 Características da geometria das fachadas do PPTe

Projeto	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
Fachada do Primeiro Piso da Torre Eiffel	Partido arquitetônico	Híbrida (Forma livre + encontrar a forma)

Fonte: Autoria própria

Forças

No processo de geração da forma da Fachada do PPTe, utilizaram-se algumas forças. As cargas estruturais e os ventos não tiveram um papel significativo na definição do desenho final das superfícies das fachadas, mas sim para definir o dimensionamento e perfil da estrutura que sustenta a pele de vidro. Essas forças foram importantes para definir o detalhe da forma. O programa também foi uma força que influenciou na definição da forma da fachada, pois era uma fachada com aberturas para circulação. Outra força que teve um papel importante na definição da forma da fachada foi a construtibilidade. No Quadro 5.34, sintetizam-se as principais forças.

Quadro 5.34 Forças-guia no processo de geração da forma da fachada

Projeto	Forças			
Fachada do Primeiro Piso da Torre Eiffel	Carga Estrutural	Programa	Térmico	Construtibilidade

Fonte: Autoria própria

5.4.5.4 Processo de Projeto: técnicas e softwares

Técnicas

Num primeiro estágio do processo de projeto, utilizaram-se algumas técnicas isoladamente. Logo em seguida, partiu-se para empregar técnicas associadas. Leduc afirma que um dos aspectos mais importantes no uso das técnicas é que ocorra uma boa ponte entre elas. Para dar prosseguimento ao processo de projeto, o RFR desenvolveu scripts que serviram como links entre diferentes ferramentas. De modo que os resultados dos cálculos avaliados permitiam resultar numa mudança direta no modelo paramétrico.

No caso da modelagem paramétrica, o que se vê é que existiu uma boa ligação com outras técnicas, principalmente, técnicas de avaliação (com simulação) e

otimização/desempenho. A modelagem paramétrica teve um papel central. Todas as outras técnicas estavam diretamente conectadas com o modelo paramétrico.

O uso do algoritmo genético se deu ainda num momento inicial do processo de projeto. Não teve uma ligação forte com outras técnicas. Serviu para definir a melhor posição de cilindros, que orientaram as superfícies das fachadas. Esses cilindros serviram para substituir as superfícies irregulares por uma matematicamente descritível. Foi usada basicamente como meio de geração de uma geometria específica do edifício.

Usou-se a Análise de Elemento Finito durante os estágios de avaliação (com simulação). Quanto a técnica de prototipagem, utilizou-se apenas para representar o modelo tridimensional do edifício, servindo para visualizar as formas que iam sendo geradas. O Quadro 5.35 mostra as principais técnicas utilizadas, os estágios do processo de projeto e os *loops* reiterativos com outras técnicas.

Quadro 5.35 Técnicas utilizadas na otimização da forma

Técnica	Estágio ciclo decisão	Loop reiterativo com
Modelagem paramétrica	Geração, Representação	Avaliação, Otimização/Desempenho
Método de Elemento Finito	Avaliação	Otimização/Desempenho
Algoritmo genético	Otimização/Desempenho	Representação
Simulated annealing	Otimização/Desempenho	Representação
Prototipagem	Representação	Otimização/Desempenho
Scripting	Geração, Otimização/Desempenho, Avaliação	Geração, Otimização/Desempenho, Avaliação, Representação

Fonte: Autoria própria

Software

A escolha dos softwares para serem empregados no projeto da fachada do PPEF deveu-se às seguintes razões, conforme explica Leduc (informação verbal):

- softwares que fossem compatíveis com as habilidades dos diferentes profissionais que participavam do processo de projeto (arquitetos, engenheiros, consultores, etc.);
- softwares que fossem compatíveis com os módulos de cálculos;

- que tivessem uma razoável diversidade de aplicação, de modo que já pudesse ser utilizado nas fases iniciais do processo de projeto;
- fossem soluções leves, fáceis de usar e muito rápidas;
- pelo projeto não ser muito grande, não se quis utilizar complexos softwares para modelagem, difíceis de usar, além de exigir alto investimento.

Os principais softwares utilizados durante o processo de geração da forma foram o Rhinoceros (Grasshopper + VBA), GSA e o *Home Made Solution*. Usou-se o GSA na realização das avaliações e cálculos estruturais. O *Home Made Solution* foi um software desenvolvido no escritório RFR em parceria com a Universidade de Viena. Utilizou-se o Rhinoceros (+ Grasshopper + VBA), entre outras funções, para análises dos resultados obtidos, por exemplo, da tecelagem. Nesse caso, realizaram-se rotinas para extrair características geométricas, como o raio entre cilindros. O 3D Max foi utilizado ainda nas primeiras fases iniciais do processo de geração da forma, a fim de representar as imagens da proposta apresentada durante o concurso. O Quadro 5. 36 apresenta os softwares mais utilizados no processo de geração da forma.

Quadro 5. 36 Softwares utilizados na geração da forma da fachada

Software	Estágio do ciclo de decisão	Tipo de solução	Habilidades para uso
Rhino 3D (+ grasshopper + programa em VBA)	Geração	Solução comercial customizado	Capacidade avançada de desenvolver script
	Avaliação (simulação)		
	Otimização/Desempenho		
3D MAX	Representação	Solução comercial	Conhecimento básico
GSA	Avaliação (simulação)	Solução comercial	Conhecimento avançado
HOME MADE solution (RFR)	Geração	Desenvolvido pelo escritório para uso em diferentes projetos	Capacidade avançada de desenvolver script
	Avaliação		
	Otimização/Desempenho		

Fonte: Autoria própria

5.4.5.5 Processo de Projeto: interoperabilidade e colaboração

Interoperabilidade

De acordo com Leduc, a interoperabilidade ocorreu muito bem dentro das equipes de projeto. Quando se trata de diferentes equipes, ele considera que, em geral, não é tão problemático na fase de projeto, haja vista que, geralmente, se trabalha com uma mesma plataforma. No caso do projeto da Foundation Louis Vuitton, por exemplo, por ser um projeto de grande porte, com mais de 100 pessoas trabalhando e por imposição do arquiteto (Frank Gehry), utilizou-se como plataforma o Digital Projects (CATIA).

No Projeto do Primeiro Piso da Torre Eiffel, por ser um projeto de pequenas dimensões, com um pequeno fluxo de dados, e não muito grandes objetos, não foi difícil trocar dados nessa primeira fase do projeto. No processo de geração da forma, utilizou-se principalmente os formatos do Rhino (3DM) e o Home Made Software (doj) que precisavam passar informações entre eles durante a otimização.

Colaboração

A colaboração no RFR é, de acordo com Leduc (informação verbal), algo completamente aleatório e difícil de descrever. Para cada caso de projeto, é um caso único. Cada projeto cria processos completamente diferentes de outros. Essa é uma questão aparentemente fácil, mas, na prática, envolve muitas pessoas que estão intrinsecamente dependentes da sensibilidade do arquiteto e do perfil do projeto. Leduc afirma que não existe um processo linear.

No Projeto do Primeiro Piso da Torre Eiffel, arquitetos e engenheiros sentaram juntos já nos primeiros passos do projeto e formaram uma equipe compacta e coerente. O trabalho está funcionando muito bem, porque há muitas trocas entre as equipes.

5.4.5.6 Processo de Projeto: geração da forma

O processo de geração da forma da Fachada do Primeiro Piso da Torre Eiffel, de acordo com Leduc, foi algo essencialmente colaborativo. Os escritórios de arquitetura e engenharia trabalharam coletivamente desde os primeiros esboços do processo de projeto. O ponto inicial foi uma ideia preliminar de forma apresentada pelo escritório de arquitetura ao RFR. Nela os

arquitetos desenvolveram a concepção inicial da forma, a qual foi elaborada no software 3D Max.

Em seguida, estabeleceram diversos *workshops*, em que as equipes discutiam alguns conceitos iniciais de projeto. Esses conceitos serviram como base para a otimização da forma. Nesse ponto o RFR realizou diversas alterações na forma inicial da superfície da fachada. Criaram um modelo parametrizado de modo a se ter certa flexibilidade no manuseio da forma, sem deixar de lado os conceitos iniciais propostos. O que deveria ser restrição e o que poderia ser mudado definiu-se nas discussões de projeto. Nessas discussões eles definiram alguns aspectos que deveriam constar na forma do edifício de modo a tornar viável. Esse foi um processo de transformar a ideia inicial em algo realizável. O primeiro passo, então, foi discutir a forma fundamentada no partido arquitetônico.

O passo seguinte foi realizar pequenas mudanças acompanhadas de análises, com base na geometria que evoluía. Nesse momento, o RFR emitiu uma opinião geral sobre a viabilidade da forma em termos de geometria, detalhamento e estrutura. Para que a forma fosse viável, o RFR sugeriu que ela fosse desenvolvida como parte de um cilindro. Desse modo se conseguiria uma superfície matematicamente calculável associada à forma do edifício. Nesse momento fizeram-se alguns cálculos para checagem da viabilidade da forma. Essa primeira fase do projeto foi de estudo da viabilidade da volumetria, informou Leduc.

Essa primeira fase realizou-se antes do concurso internacional e garantiu que a equipe tivesse certeza da viabilidade do projeto.

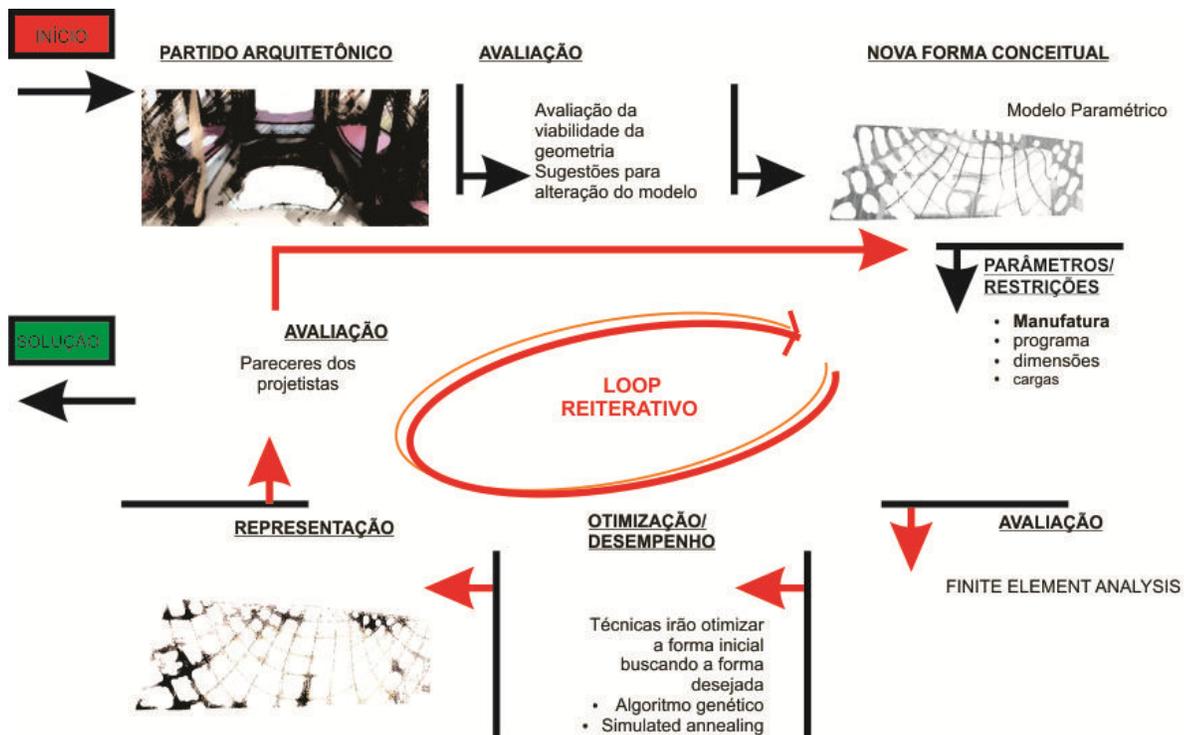
Vencido o concurso, iniciou-se a segunda fase, que se constituiu na otimização da forma. Nesse processo a forma alterou-se progressivamente até a solução mais satisfatória do ponto de vista arquitetônico, da construtibilidade e de economia. Embora diversas alterações tenham sido realizadas, a forma final (até o momento) está próxima da proposta inicial apresentada no concurso, o que Leduc afirma ser pelo fato de os escritórios de engenharia e arquitetura estarem trabalhando muito próximos desde os momentos iniciais do processo de projeto.

De modo resumido, pode-se dizer que o processo de geração da forma se iniciou com uma forma conceitual proposta pelo escritório de arquitetura e apresentada no 3D Max (Figura 5.45). A equipe de engenharia avaliou preliminarmente essa forma. Nesse momento, sugeriram-

se alterações na geometria da forma de modo a tornar o modelo mais viável. Surgiu um novo modelo conceitual, ainda preliminar. Esse modelo foi utilizado durante a fase do concurso.

Após essa fase, iniciou-se a etapa de otimização da forma. Nesse estágio a forma mais apropriada foi determinada automaticamente por meio das restrições de resistência e rigidez dos painéis que definem a superfície. Esse processo de otimização se iniciou com a criação de uma superfície no Rhino, a qual foi otimizada e “ocupada” por painéis. As dimensões mínimas dos painéis foram definidas. O modelo então foi calculado no GSA e as forças que atuam em cada um dos elementos foram exportadas para o programa *Home Made Solution*, que determinou as dimensões mínimas necessárias. Quando se mudava o tamanho dos painéis da fachada, mudava-se o peso próprio e a rigidez das peças, portanto, a distribuição das forças. Esse processo se repetiu até se alcançar uma solução mais eficiente.

Figura 5.45 Processo de geração da forma das fachadas do PPTE



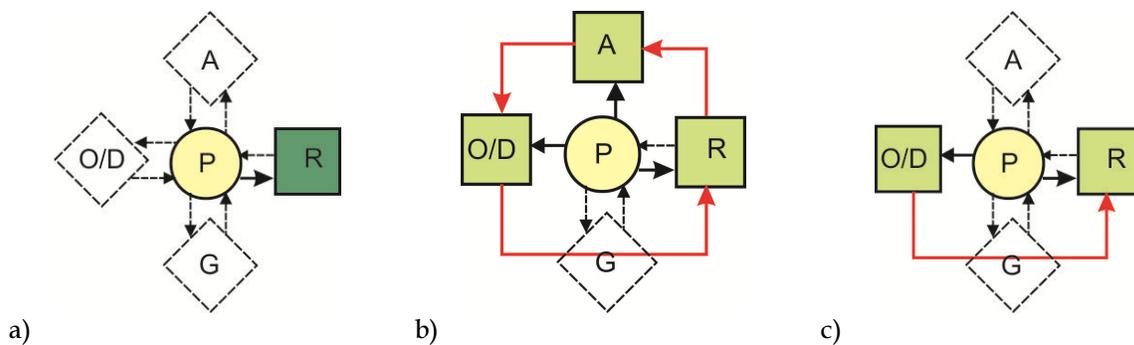
Fonte: Autoria própria

5.4.5.7 Modelo Digital e Nível de Automação

Destaca-se a existência de três principais classes de interação e relação entre projetistas e componentes do projeto digital (Figura 5.46). A primeira classe (Figura 5.46a), analógica, apareceu nos primeiros momentos do processo de projeto, quando os arquitetos construíram um modelo digital (não parametrizado) em 3D do projeto no software 3D Max e apresentaram ao escritório RFR. Essa classe também ocorreu em outros estágios do processo de projeto e foi um dos meios de discussão e colaboração entre diferentes equipes de projeto.

A segunda classe (Figura 5.46b) se deu durante o processo de otimização da forma. Nesse caso, a forma representada num modelo passou por um processo automatizado de avaliação usando o GSA e otimização da superfície, com um processo evolutivo até se chegar à forma definitiva. Nesse caso existia uma ligação direta e automatizada entre avaliação, otimização e representação.

Figura 5.46 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma das fachadas do PPTE



Fonte: Autoria própria

A terceira classe (Figura 5.46c) é semelhante à anterior, porém a avaliação deixou de ser automatizada, fez-se manualmente pelos projetistas durante reuniões de projeto. Nesse caso, Leduc explica que, com as discussões, acrescentavam-se ou se modificavam novos parâmetros no modelo paramétrico. Em seguida, otimizava-se e representava-se a forma no modelo, momento em que os projetistas discutiam os efeitos dessas mudanças. Nesse caso, representação e otimização ocorriam de modo automatizado.

As classes apresentadas acima e usadas no processo de geração da forma seguiram um processo semiautomatizado, com alguns estágios de decisão semiautomatizados e outros

manuais. Segundo informou Leduc, entre outros motivos que levam à quebra na automação do processo de geração da forma, estão: o fato de o processo ser colaborativo e requerer diversas trocas, que nem sempre ocorriam em uma mesma plataforma; a amplitude do processo de decisões, com a realização de muitos passos durante o processo de geração da forma.

5.4.6 ESTUDO DE CASO 6: Sidra Trees, Qatar National Convention Centre

5.4.6.1 Escritório: Sasaki + Partners / SAP

O escritório Sasaki + Partners foi fundado em 1980, depois de o próprio Sasaki haver trabalhado dez anos no escritório Kimura Structural Engineers e ter passado alguns anos como consultor estrutural. O escritório já trabalhou com grandes nomes da arquitetura, por exemplo, Arata Isozaki, Toyo Ito, SANAA. Por meio de processos colaborativos, desde os primeiros contatos com as equipes de projeto, o Sasaki + Partners conseguiu desenvolver soluções inovadoras para novos problemas estruturais. Sasaki tem uma formação acadêmica e de pesquisador que influenciou sua trajetória como engenheiro. Já lecionou na Universidade Nagoya e hoje leciona na Universidade Hosei em Tóquio (BHATTARAI, 2011).

Algumas das mais avançadas técnicas estruturais de geração e análises de formas desenvolvidas pelo escritório foram relatadas no livro “Flux structure” (SASAKI, 2005). Para responder à demanda de novos projetos arquitetônicos, Sasaki desenvolveu novas abordagens metodológicas baseadas no conceito de evolução e princípios de auto-organização (SASAKI, 2008).

5.4.6.2 Projeto: Qatar National Convention Centre

Informações técnicas do projeto

O Quadro 5.37 mostra a grande dimensão do projeto. Só a entrada principal do edifício, que será o objeto de estudo desta seção, tem 7.500 metros quadrados.

Quadro 5.37 Informações técnicas do projeto

<i>Informação</i>	<i>Descrição</i>
Nome do projeto	Qatar National Convention Center (QNCC)
Localização	Doha (Qatar/ Emirados Árabes)
Características	Sidra Trees do Qatar National Convention Center
Área total	177.000 m ²
Número de pisos	3
Dimensões entrada principal	250 metros de comprimento X 30 metros de largura
Área entrada principal	7.500 m ²
Principais elementos do programa	Espaço para exposição, sala de conferência, 2 teatros, 3 auditórios, 57 salas de reuniões; foyers com área para exposições, lounges, suítes de hospitalidade, centros de negócios, salas de mídia
Custo	US\$ 720.000.000,00
Custo m²	US\$ 4.068/m ²
Ano do projeto/ construção	2004/ 2011
Status do projeto	Finalizado
Cliente	Qatar Foundation
Arquiteto - concepção	Arata Isozaki
Arquiteto - detalhamento	Yamasaki International (Responsável por todas as especificações, realização dos desenhos para construção e documentação.
Engenheiro estrutural	SAP/ Sasaki + Partners
Desenvolvimento projeto estrutural	Buro Happold
Projetista construtor	Baytur

Fonte: Autoria própria

Descrição do edifício

O estudo de caso é a Entrada Principal do Qatar National Convention Centre (Sidra Trees do QNCC). O QNCC foi inaugurado em 2011 (Figura 5.47). É o primeiro edifício de seu porte a ser construído na região. Ocupa uma área de 177.000 metros quadrados. Tem um programa que conta com espaço de exposições, convenções, eventos de gala, shows, casamentos, banquetes, etc. (1).

O edifício foi concebido tendo como foco a sustentabilidade. É o primeiro edifício desse tipo a ter a certificação de ouro do U.S. Green Building Council's *Leadership in Energy and Environment Design* (LEED). Para isso, vários aspectos do projeto foram pensados visando atingir os mais elevados níveis de eficiência energética e sustentabilidade, por exemplo, criação de área de painéis de energia solar e iluminação de salas de exposição com LED (QATAR NATIONAL CONVENTION CENTRE, 2009).

Figura 5.47 Vistas externas QNCC



a) Nota: a) vista de todo o complexo; b) vista aérea do QNCC, com indicação da entrada principal; c) vista do Sidra Trees (QNCC)

Fonte: <www.qatarconvention.com>

A entrada do QNCC foi projetada pelo arquiteto Arata Isozaki em parceria com Mutsuro Sasaki. O conceito do projeto era de uma “grande árvore Sidra” (*Sidra Tree*), com suas fortes raízes capazes de florescer sob o forte clima árido do deserto. De acordo com Tara (2010), a árvore também tinha a função simbólica de representar força e crescimento, servindo como um ícone para o Qatar, além de ser o símbolo da Fundação Qatar, que financiou o projeto.

A ideia inicial da *Sidra trees* era de marcar o GNCC com uma entrada à altura do edifício (Figura 5.48). Essa entrada é tão especial e complexa que o especialista em construção em aço Robert Obbard (responsável por outros projetos, como o Swiss Re) precisou trabalhar em parceria com o belga Buyck Victor, que desenvolveu a estrutura como um pacote independente do restante do edifício, e com a consultoria de Buro Happold, que foi responsável pelo desenvolvimento do projeto estrutural (LANE, 2009).

Figura 5.48 Vistas da entrada do Sidra Trees (QNCC)



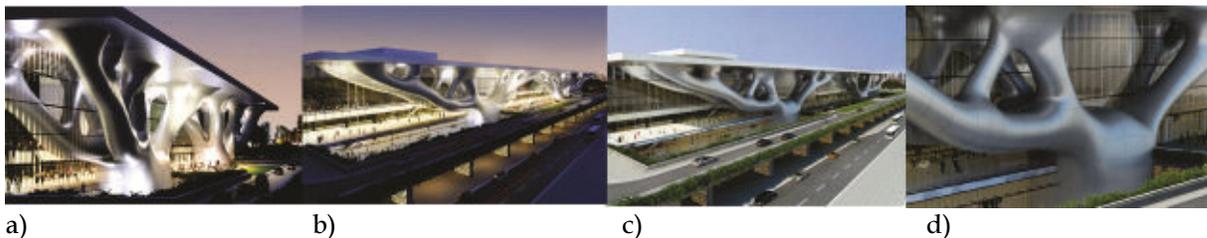
a) Nota: a, b, c) ramos das “árvores” com o pano de vidro no meio; d) detalhe do pilar em forma de tronco de árvore.

Fonte: <www.qatar.convention.com>

A entrada principal constitui-se de uma grande laje de 250 metros de comprimento por 30 de largura sustentada por dois "troncos de árvores" localizados a cerca de um terço de cada lado da entrada. Cada um dos troncos tem quatro ramos principais de cerca de 7 metros de diâmetro na base e 4 metros de diâmetro na parte superior. Desses quatro ramos, um par se

estende em direção à extremidade da plataforma, e o outro se inclina sobre a área central da entrada (Figura 5.49). O pano de vidro que separa o interior do exterior se insere no meio dos ramos, dividindo a estrutura ao meio, ao longo da sua extensão maior. A laje da cobertura, em aço, precisou ser resistente o suficiente para aguentar grande balanço, resistindo a qualquer movimento que possa comprometer a estrutura da fachada de vidro, localizada no meio da entrada (TARA, 2010).

Figura 5.49 Vistas internas do Sidra Trees (QNCC)



a) b) c) d)
 Nota: a, b) ramos das “árvores” com o pano de vidro no meio; c, d) vista interna da entrada, com vista do pano de vidro cortando a entrada ao meio

Fonte: <www.qatar.convention.com>

Pela escala do edifício e pelo caráter orgânico da forma da estrutura da entrada principal do QNCC, sua construção exigiu muita perícia e trabalho (Figura 5.50). Entre os fatores que dificultaram o processo de construção, podem-se destacar a complexidade da superfície dos pilares e a dificuldade de transporte dos componentes (importados da Malásia e armazenados em contêineres de 12 metros de comprimento). Pela complexidade da forma, foram necessários 4.700 painéis de aço, cada um único, e 70% deles com uma curvatura única, e 30% com uma dupla curvatura (LANE, 2009). Para que a logística de montagem funcionasse, o escritório de Buro Happold desenvolveu um software para garantir a precisão da geometria das placas. Esse software enviava o modelo geométrico diretamente para as máquinas de Victor Buyck, na Malásia, que cortava as peças precisamente.

Figura 5.50 Construção da Sidra Trees (QNCC)



a) b) c) d) e)
 Nota: a) vista dos andaimes; b) vista de torres com macaco hidráulico no topo; c) estrutura com apoios para fixar placas externas; d) vista internada peça; e) detalhe das placas fixadas a um pilar

Fonte: <<http://www.building.co.uk/steel-yourself-the-qatar-national-convention-centre>>

5.4.6.3 Processo de Projeto: geometria e forças

Geometria

O princípio geométrico da forma inicial era uma geometria básica. O que se tinha era uma forma básica constituída por uma grande laje e oito apoios em forma de duas pirâmides invertidas. Em seguida, deflagrou-se um processo evolucionário de geração da forma.

Do ponto de vista de processo de geração da forma, a estrutura geométrica aplicada no processo de geração da forma foi por meio de encontrar a forma (*form finding*). Ou seja, buscou-se uma superfície geométrica baseada na redução da tensão e distribuição do esforço uniforme na estrutura (Quadro 5.38).

Quadro 5.38 Características da geometria usada na geração da forma

Projeto	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
Sidra Trees (QNCC)	Geometria básica	Encontrar a forma

Fonte: Autoria própria

Forças

No processo de geração da forma, utilizou-se essencialmente a carga estrutural como principal força. Menos importante de que a carga estrutural, mas também importante, foi a distribuição do programa em planta com o posicionamento dos pilares. O Quadro 5.39 sintetiza as principais forças.

Quadro 5.39 Forças-guia no processo de geração da forma

Projeto	Forças	
Sidra Trees (QNCC)	Carga estrutural	Programa

Fonte: Autoria própria

5.4.6.4 Processo de Projeto: técnicas e softwares

Técnicas

Durante o processo de geração da forma e desenvolvimento do projeto, utilizaram-se algumas técnicas de apoio à decisão. No Quadro 5.40, apresentam-se as principais técnicas utilizadas.

Quadro 5.40 Técnicas utilizadas na geração da forma da Sidra Trees (QNCC)

Técnica	Estágio ciclo decisão	Loop reiterativo com
Modelagem paramétrica	Representação	Geração
Análise de Elemento Finito	Avaliação	Representação
Bi-directional Evolutionary Structural Optimization	Otimização/Desempenho Geração	Representação
Prototipagem	Representação	Otimização/Desempenho
Scripting	Geração, Otimização/Desempenho, Avaliação	Geração, Otimização/Desempenho, Avaliação, Representação

Fonte: Autoria própria

A principal técnica utilizada na geração da forma baseou-se no *Extended Evolutionary Optimization*. Essa técnica, com base nos resultados da Análise de Elemento Finito, implementou mecanismo de otimização progressiva da forma inicial. Outras técnicas como a prototipagem e modelagem paramétrica foram utilizadas em estágios mais avançados do processo de projeto, quando um partido arquitetônico já havia sido definido.

Ferramentas

Na etapa inicial do processo de geração da forma, o principal software utilizado foi desenvolvido no escritório de Mutsuro Sasaki, baseado no Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO). Durante o desenvolvimento do projeto no escritório Buro Happold, a forma foi otimizada. Nessa fase várias ferramentas foram usadas visando à otimização geométrica, estrutural e de fabricação.

5.4.6.5 Processo de Projeto: interoperabilidade e colaboração

Interoperabilidade

Em quase todos os momentos do processo de geração da forma, existiu uma boa interoperabilidade. Num primeiro momento, a forma foi gerada num software desenvolvido pelo escritório de Mutsuro Sasaki, baseado no método BESO. Utilizou-se esse processo para a criação do partido arquitetônico. Com base na forma do partido arquitetônico, desenvolveu-se o projeto no escritório Buro Happold. Nessa fase, o modelo digital foi reconstruído num software de modelagem paramétrica. A partir de então, o processo seguiu um caminho liso, com alta interoperabilidade. Graças a um sistema desenvolvido no Buro Happold, foi possível criar um

fluxo direto de informações entre as fases de otimização da forma e fabricação. Por meio de um modelo integrado, facilitou-se a otimização da solução e possibilitou-se a redução de custos e um fluxo de informações liso direto entre o projeto e a fabricação.

Esse processo liso permitiu que dezenas de milhares de peças únicas do projeto, desde peças planas a formas que usavam curvatura complexa, fossem documentadas eletronicamente e conduzidas digitalmente do escritório de projeto para a fabricação, sem a necessidade de retrabalhos e eliminando o uso de desenhos em papel (BURO HAPPOLD, 2011b).

Esse modelo integrado de informação, baseado no BIM, desenvolvido no escritório Buro Happold, permitiu uma completa integração da modelagem paramétrica com a avaliação da solução, a otimização, a fabricação e o detalhamento da construção.

Colaboração

Desde o momento inicial da geração da forma da Sidra Trees (QNCC), a colaboração sempre foi intensa. Segundo Sasaki (2005), a forma não poderia ser gerada automaticamente no computador, pois era fundamental a presença do arquiteto para julgar as soluções geradas e discutir com os engenheiros novos parâmetros e diretrizes de projeto. Na opinião dele, a geração da forma é uma atividade que envolve o julgamento de valores. O julgamento do valor estético é cargo do arquiteto; o julgamento do valor mecânico, do engenheiro estrutural (SASAKI, 2005).

Para a geração da forma do projeto, empregou-se um sistema misto em que a forma era gerada automaticamente, resultado de uma solução que satisfazia às condições mecânicas e aos parâmetros de projeto, utilizando o BESO. Em seguida, os projetistas discutiam e avaliavam os resultados, propunham alterações nas variáveis de projeto, e o ciclo evolucionário se reiniciava. Esse processo era essencialmente colaborativo.

5.4.6.6 Processo de Projeto: geração da forma

O processo de geração da forma da *Sidra Trees* do QNCC, de acordo com Sasaki (2005), teve uma forte inspiração na auto-organização e na morfogênese. A fonte de inspiração desse projeto foi uma figueira. Essa árvore consegue se sustentar por meio de uma série de raízes aéreas que se enroscam uma nas outras. Embora haja um grande momento de flexão na base do

tronco, sua deformação permitiu ampliar a seção transversal, de modo que o nível de estresse se tornasse equalizado, de acordo com o princípio do estresse constante.

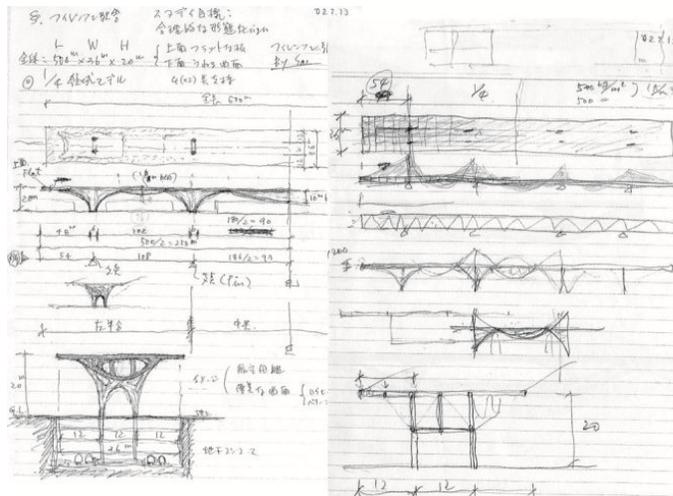
Se a resistência dos materiais for constante, a eficiência mecânica máxima será alcançada com o uso mínimo de material, por meio do aumento da seção visando-se ter um estresse constante. Nesse caso, tem-se uma estrutura que tende para uma racionalidade máxima. Baseado na lógica por trás da estrutura dessa árvore, Sasaki começou a experimentar essa ideia na arquitetura, por meio de um método chamado por Arata Isozaki de *flux structure* (SASAKI, 2005).

O *flux structure* baseia-se no método denominado Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO). O BESO é uma evolução do ESO. Esse último visa encontrar a melhor solução para um projeto estrutural. Usa o conceito de eliminação progressiva de material ineficiente da estrutura de modo que a estrutura evolua para uma condição ótima (HUANG; XIE, 2010). O ESO utiliza a tensão *Von Mises* como valor de referência. O BESO é uma solução mais robusta, bi-direcional do ESO. Nesse é possível adicionar e apagar o material de uma estrutura, de modo simultâneo (QUERIN *et al.*, 2000).

Por meio de um processo de análise não linear, Sasaki (2008) mostrou que foi possível compreender a “evolução biológica” da forma da estrutura, utilizando uma estrutura global dada e relações entre a forma e seus procedimentos mecânicos. Desse modo, foi viável gerar uma forma estrutural extremamente racional, por meio de uma geometria que se aproxima ao máximo de uma condição de uniformidade de tensão, com uma flexão reduzida ao mínimo (SASAKI, 2005, p. 73).

O processo de geração da forma da *Sidra Trees* do QNCC iniciou-se com a definição de um volume prismático de 250 metros de comprimento por 30 metros de largura e 20 metros de altura, com dois grandes apoios com separação entre si em mais de 100 metros. Nesse processo inicial, elaboraram-se croquis visando descrever o comportamento estrutural dessa grande cobertura (Figura 5.51). Como condição do projeto, exigia-se que a cobertura fosse definida por um volume retangular completamente plano. O material usado foi o aço e foi definida a carga estrutural que deveria ser uniformemente distribuída ao longo da cobertura.

Figura 5.51 Croquis realizados por Sasaki que descrevem as principais forças presentes na estrutura do Florence New Station e da entrada principal do QNCC



Fonte: Sasaki (2005, p. 158)

O processo de evolução da forma utilizando-se o método BESO foi descrito, a seguir, por meio de uma série de passos. Diferentemente do processo utilizado no projeto do *Florence New Station* (cf. Figura 65.1, Sasaki, 2005, p. 78), no qual a análise partiu de uma condição muito básica de forma (apenas quatro colunas e uma cobertura), na *Sidra Trees do Qatar Education City Convention*, a equipe utiliza um ponto inicial com uma forma muito mais avançada. Dessa forma, foi possível economizar uma grande quantidade de tempo de cálculo e direcionar a morfologia da forma.

Os passos evolucionários usados na geração da forma da *Sidra Trees* do QNCC foram os seguintes:

- início com a construção de um modelo definido por uma forma básica, compreendido pelo volume retangular da cobertura e dois apoios em forma de pirâmides invertidas (Figura 5.53, passo 1);
- com esse modelo foi possível iniciar a realização iterações morfológicas utilizando FEA; já era possível avistar os primeiros modelos evolutivos (Figura 5.52, passo 2);
- a evolução na estrutura da placa de cobertura levou a um aumento na tensão da laje, o que resultou no aumento da espessura de algumas partes (Figura 5.52, passo 3).

- à medida que a forma foi passando por evolução, os suportes foram tornando-se mais espessos e inclinados (Figura 5.52, passos 4 e 5);
- a estrutura de apoio passou por um processo de mutação, de modo que elementos naturais de uma catenária passam a ser materializados, desdobrando-se da estrutura inicial dos apoios, de modo que pudesse tornar-se mais resistentes aos esforços axiais; assim, reduziu-se a tensão dos apoios na estrutura da cobertura de modo a apoiar mais eficazmente a placa da cobertura (Figura 5.52, passos 6, 7, 8 e 9);
- a forma evoluiu e aproximou-se da forma final; as formas das partes das estruturas locais foram refinadas por meio de mudanças evolucionárias pontuais de modo a se aproximar do estágio final (Figura 5.52, passos 10 e 11);
- a forma final foi estabelecida (Figura 5.53, passo 12).

Figura 5.52 Os passos evolucionários usados na geração da forma Entrada Principal do QNCC

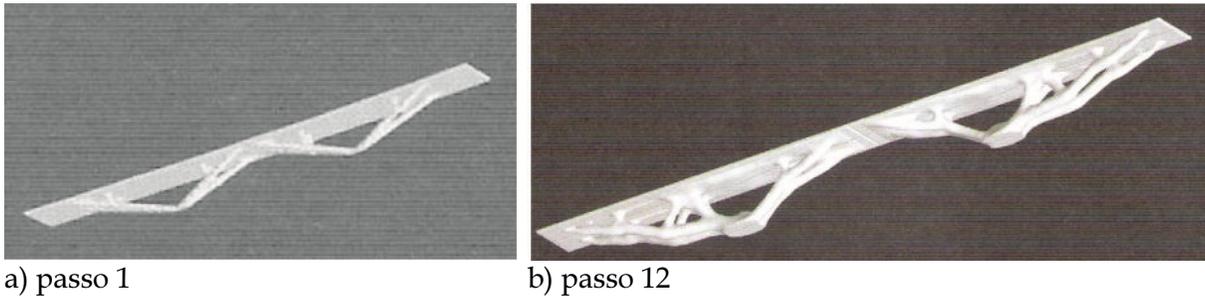


Nota: Passos evolucionários entre o número 2 e o número 11

Fonte: Sasaki (2008, p. 110)

A forma final, de acordo com Sasaki (2005), satisfaz os critérios do projeto arquitetônico e, ao mesmo tempo, a flexão dos elementos estruturais foi mantida a um mínimo por toda a estrutura e com a variável de referência de *Von Mises* distribuída igualmente por toda a área da cobertura. Desse modo, alcançou-se o objetivo de criar uma forma estruturalmente racional, com a máxima eficiência na transmissão dos esforços sem desperdícios mecânicos.

Figura 5.53 A geometria básica, passo 1, usada no processo evolucionário Entrada Principal do QNCC e a forma resultante representando o passo 12



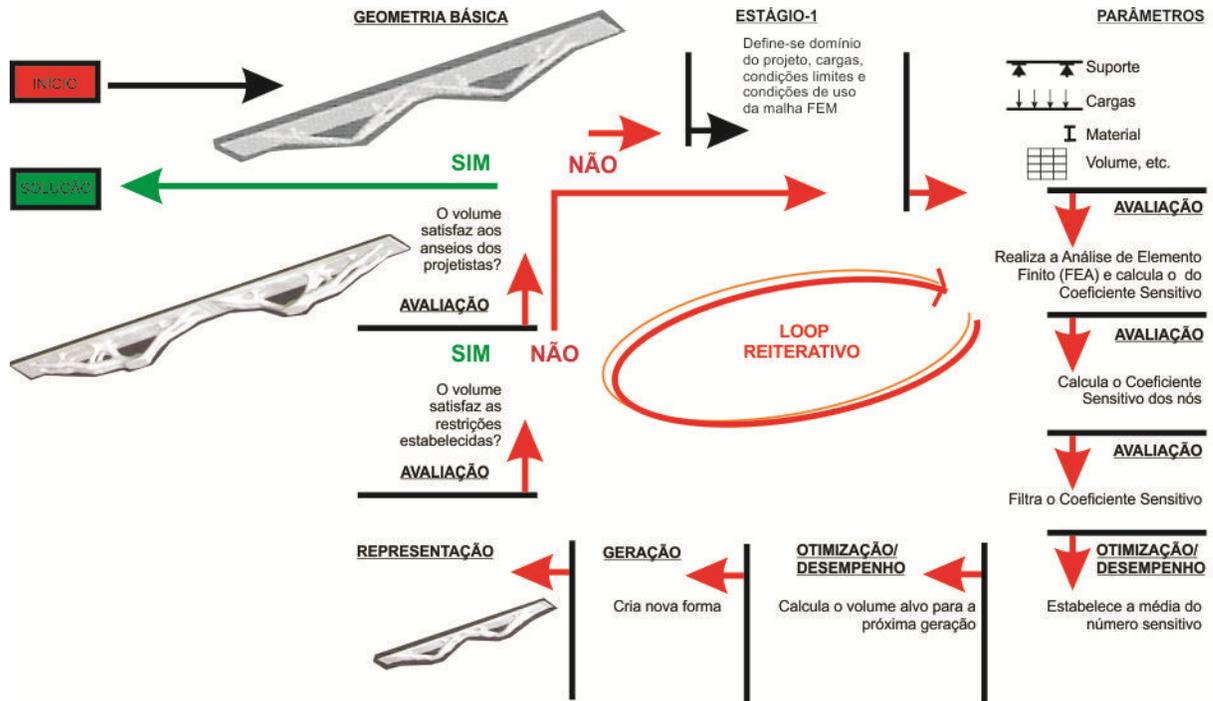
Fonte: Sasaki (2008,p.110)

Embora aparentemente automatizado, o processo de geração da forma da Sidra Trees iniciou-se com a definição dos parâmetros programáticos, por exemplo, dimensões do ambiente, número e localização dos apoios, altura do piso, etc. Definidas as condições, começou o processo de geração da forma. De acordo com Sasaki (2005), esse foi um processo de projeto constituído por uma sequência repetitiva de operações dentro de um computador. Essa sequência foi definida por condições estruturais (mecânicas) e condições arquitetônicas (parâmetros de projeto).

Para acompanhar o processo de geração da forma, utilizou-se uma interface gráfica, de modo que era possível acompanhar a evolução da forma. Em diferentes estágios do processo, os arquitetos interagiam com o sistema, alterando as variáveis de projeto visando encontrar a forma que também satisfizesse aos objetivos arquitetônicos.

Sasaki (2005) afirmou que, pela dificuldade em estabelecer uma descrição quantitativa dos requisitos estéticos de projeto, o sistema precisou, em alguns momentos, ser semiautomatizado. Assim,intercalaram-se processos automatizados de geração da forma com processos semiautomatizados, quando os arquitetos julgavam os resultados gráficos das formas gerados no computador e alteravam as variáveis de projeto, visando atender melhor às condições estéticas requeridas (Figura 5.54).

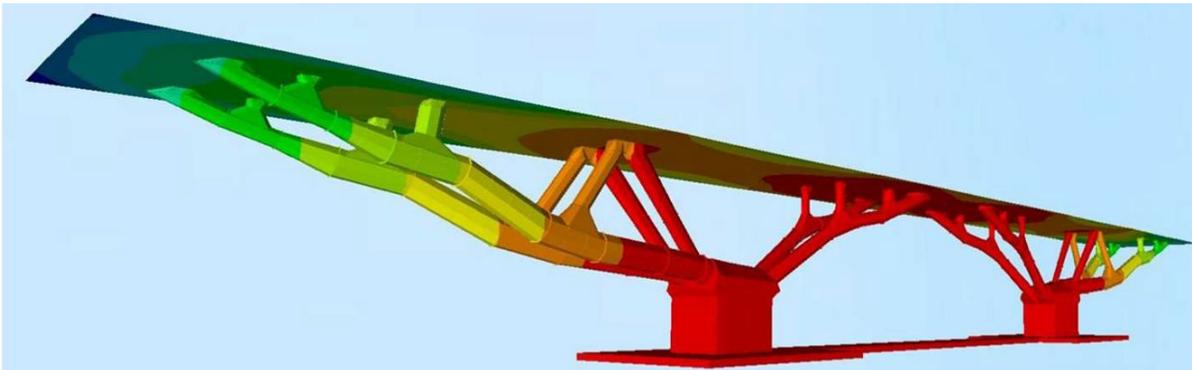
Figura 5.54 Processo de geração da forma, indicando a forma inicial e a solução do projeto



Fonte: Autoria própria

Definida a forma do partido arquitetônico, ele sofreu uma série de adaptações na sua estrutura, no seu material e na sua forma, visando se adequar aos custos e às condições de fabricação e construção. Durante esse processo de desenvolvimento, o escritório de Buro Happold utilizou algumas ferramentas computacionais desenvolvidas no próprio escritório para realizar uma série de otimizações (Figura 5.55) na forma da estrutura visando reduzir custos, facilitar a fabricação e melhorar a construtibilidade (BURO HAPPOLD, 2011b).

Figura 5.55 Visualização da avaliação da estrutura da Sidra Trees para posterior otimização (QNCC)

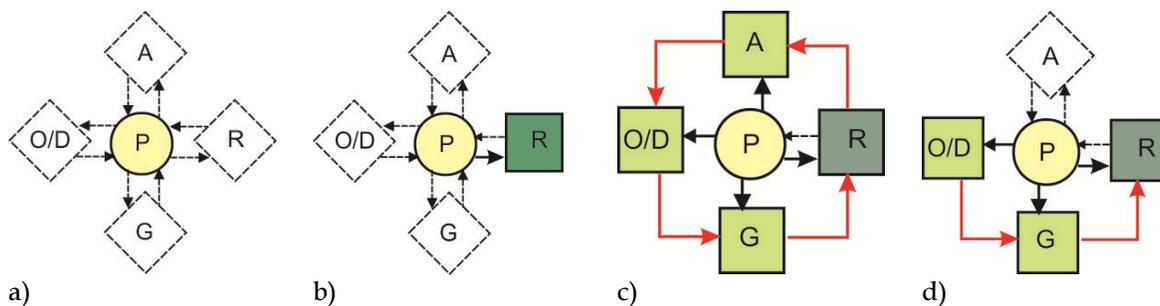


Fonte: <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions>>

5.4.6.7 Modelo Digital e Nível de Automação

Usaram-se no projeto quatro principais classes de interação e relação de projetistas e componentes do projeto digital (Figura 5.56). A primeira classe (Figura 5.56a), analógica, apareceu nos primeiros momentos do processo de projeto, quando Mutsuro Sasaki, após uma discussão sobre o conceito do projeto com Arata Isozaki, fez esboços sobre a tensão inicial do projeto com definição dos apoios, inclinações e dimensões gerais do edifício.

Figura 5.56 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma da Entrada do QNCC



Fonte: Autoria própria

A segunda classe (Figura 5.56b) surgiu com a criação em um modelo digital da geometria básica. A terceira classe (Figura 5.56c) ocorreu com a implementação do método BESO. Nesse caso, o processo de geração da forma era completamente automatizado. A quarta classe (Figura 5.56d) ocorreu nos intervalos entre gerações, quando os arquitetos julgavam os resultados gráficos das formas gerados no computador e alterava as variáveis de projeto de modo a adaptar

à sua inspiração estética. Nesse caso, o estágio de avaliação ocorria de modo manual, enquanto os demais estágios, permaneciam automatizados.

5.5 Análise e Discussões

Por meio das investigações apresentadas nos estudos de caso, foi possível estabelecer uma série de conjecturas para o processo de Projeto Performativo. Nesta seção apresentam-se análises comparativas das características dos estudos de caso, com base nos protocolos analisados. Por meio desse procedimento, classificaram-se os tipos de projeto digital performativos e pôde-se compreender alguns dos conceitos teóricos relacionados com o modelo digital. As principais categorias utilizadas nas análises comparativas foram: o perfil de uso dos edifícios, a geometria, as principais forças empregadas na geração da forma, as técnicas, as ferramentas, a interoperabilidade, a colaboração, o nível de automação e as características do processo de geração da forma. Depois da realização das análises comparativas, fez-se uma classificação dos modelos de projeto performativo por meio do agrupamento dos métodos com características semelhantes. Na parte final, realizaram-se discussões sobre métodos de projeto digital baseadas em modelo performativo e sobre o modelo performativo em si.

5.5.1 Comparações das unidades-caso

5.5.1.1 Perfil do Uso dos Edifícios

Um dos primeiros aspectos a serem considerados ao avaliar a arquitetura do edifício é identificar o perfil de seu uso: se público, privado ou misto (público e privado). O Quadro 5.41 mostra que todos os edifícios pesquisados têm o uso público. Dos seis edifícios estudados, quatro deles são usados para o lazer (dois museus, centro de convenções e centro turístico) e dois têm uso educacional (faculdade e centro de aprendizagem).

Observa-se que são edifícios ícones, ousados e representam conceitos inovadores para resolução de novos problemas de projeto. São projetos que partiram do uso de métodos de

vanguarda, criados especificamente para resolução de problemas únicos de projeto. Expressam a força e o poder da solução arquitetônica, não apenas pela forma ou pelo material, mas, no modo como o conhecimento e a sabedoria são apropriados e transformados de modo inteligente em forma arquitetônica destinada ao lazer, à educação e à cultura.

5.5.1.2 Porte do Edifício

Uma questão importante relacionada com o uso é o porte do edifício. Edifícios de grande porte muitas vezes requerem grandes e complexos processos de projeto. Procurou-se, então, investigar se existia relação entre métodos e o porte do edifício. Para isso, investigaram-se as dimensões dos edifícios. Para definir se um edifício era de pequeno ou grande porte, estabeleceu-se como critério de referência a área. Consideraram-se como edifícios de grande porte aqueles cujas áreas construídas excediam os 10.000 metros quadrados. Edifícios com áreas construídas menores que isso foram considerados de pequeno porte. Dos seis projetos estudados, três (50%) foram considerados como de pequeno porte e 3 (50%) de grande porte (Quadro 5.41).

Quadro 5.41 Perfil do uso e porte dos estudos de caso

Nº	Projeto	Perfil Uso	Tipo	Uso	Porte
1	Louvre Abu Dhabe	Público	Lazer	Museu	Grande
2	Extensão da Hochschule für Technik	Público	Educacional	Faculdade	Pequeno
3	Smithsonian Courtyard Enclosure	Público	Lazer	Museu	Pequeno
4	Rolex Learning Center (EPFL)	Público	Educacional	Centro de aprendizagem	Grande
5	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Público	Comércio	Lojas	Pequeno
6	Qatar National Convention Center	Público	Lazer	Centro de convenções	Grande

Fonte: Autoria própria

Esses números mudam quando avaliada a área do edifício gerada utilizando o Modelo Performativo. Nesse caso, o projeto do Qatar National Convention Centre, passou a ser considerado como de pequeno porte, pois o método em questão se refere à Sidra Trees, cuja área é de 7.500 metros quadrados. Considerando essa segunda situação, tem-se um percentual de 66% dos projetos considerados como de pequeno porte.

O que se pode observar é que não existe uma relação direta entre dimensão do edifício e o uso ou não do Modelo Performativo. Conjectura-se que métodos baseados no Modelo Performativo podem ser utilizados em diferentes portes de edifícios. Alguns métodos, como aqueles relacionados com as formas de grande complexidade (*Bi-directional Evolutionary Structural Optimization*, por exemplo), podem até ser inviável para projetos de grande dimensão, em virtude do custo elevado, porém, outros métodos performativos podem ser utilizados para resolução de problemas de projeto que envolvam grandes dimensões.

5.5.1.3 Escala e Uso de Modelo Digital

Os métodos de geração da forma baseados nos Modelos Performativos empregados nas unidades-caso foram usados em diferentes escalas da geometria dos edifícios. Em alguns projetos, o método foi usado para gerar a volumetria principal do edifício (geometria global), em outros, foram utilizados para gerar uma cobertura, uma fachada ou uma parte do edifício – geometria local (Quadro 5.42). Essas informações mostram que os Modelos Performativos na prática de projeto estão, em geral, associados a outros modelos de projeto digital. O que se observou, dos estudos de caso, é que na etapa de concepção do projeto foram usados múltiplos métodos de projetos digitais. Em algumas situações, por exemplo, no estudo de caso do Louvre Museum Abu Dhabi ou do Qatar National Convention Center, foi utilizado mais de um modelo baseado no desempenho: Modelo Performativo e o Modelo CAD para Avaliação. O primeiro foi usado no desenvolvimento da cúpula e o segundo no desenvolvimento dos espaços mais funcionais do edifício (as múltiplas salas de exposição). Nesses outros ambientes, foi utilizada uma série de softwares de avaliação de desempenho. Eles tiveram um papel importante na melhoria do desempenho ambiental do edifício.

Quadro 5.42 Escalas de uso dos modelos performativos para geração da forma do edifício

GEOMETRIA GLOBAL	GEOMETRIA LOCAL		
	<i>Cobertura</i>	<i>Parte do edifício</i>	<i>Fachada</i>
2 HFT Stuttgart	1 Louvre Museum Abu Dhabi	6 Qatar National Convention Center	5 Primeiro Piso da Torre Eiffel
4 Rolex Learning Center, EPFL	3 Smithsonian Institution Courtyard		

Fonte: Autoria própria

Em alguns projetos, por exemplo, o Projeto do Primeiro Piso da Torre Eiffel, utilizou-se o Modelo Performativo no desenvolvimento das fachadas dos edifícios. Todavia, desenvolveram-se as demais partes utilizando-se o Modelo CAD Descritivo.

5.5.1.4 Geometria

Nesta seção apresenta-se um quadro comparativo das categorias geométricas usadas na geração da forma dos edifícios estudados neste trabalho. O que se pode observar no Quadro 5.43, é que nenhum dos projetos utilizou “princípio” como forma inicial. Dos seis estudos de caso, 3 deles (50%) utilizaram como forma inicial a “geometria básica” e três (50%) utilizaram o “partido arquitetônico”.

Esses dados mostram que, em todos os casos, a forma inicial já apresentava certo grau de amadurecimento. Aquelas que partem de uma geometria básica ainda não têm uma identidade formal capaz de associá-la diretamente à forma resultante, porém já mostravam algumas diretrizes que estavam presentes na forma final. Já as formas iniciais baseadas no partido arquitetônico, têm grande similaridade com a forma final, o que mostra, nesses casos, um processo essencialmente de otimização da forma.

Quadro 5.43 Comparativo das categorias geométricas usadas na geração da forma

Nº	Unidades-casos	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
1	Louvre Abu Dhabe	Geometria básica	Híbrida (geometria matemática básica + geometria matemática simples + forma livre)
2	Extensão da Hochschule für Technik	Geometria básica	Híbrida (geometria matemática básica + encontrar a forma)
3	Smithsonian Courtyard Enclosure	Partido arquitetônico	Híbrida (forma livre + geometria matemática simples)
4	Rolex Learning Center (EPFL)	Partido arquitetônico	Otimização de Pareto
5	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Partido arquitetônico	Híbrida (forma livre + encontrar a forma)
6	Qatar National Convention Center	Geometria básica	Encontrar a forma

Fonte: Autoria própria

Das categorias geométricas que iniciaram com um partido arquitetônico, duas delas partiram de uma solução híbrida de geometria e uma delas partiu da Otimização de Pareto. No caso das geometrias básicas, duas delas utilizaram uma geometria híbrida e uma delas utilizou o

princípio de “encontrar a forma”. Os projetos que utilizaram soluções híbridas foram aqueles cujas geometrias podiam ser decompostas em diferentes partes. Dos projetos que partiram de categorias híbridas, dois utilizaram a “geometria matemática básica”, um deles utilizou o princípio de “encontrar a forma” e um utilizou a geometria matemática simples. Esses modelos geométricos, pela sua possibilidade de descrição matemática, são mais eficientes estruturalmente e apresentam melhor construtibilidade.

O que se pode concluir com a análise das categorias geométricas utilizadas é que o Modelo Performativo parte de um espaço de soluções. Este pode ser mais aberto ou fechado, dependendo da categoria geométrica utilizada. Se se iniciar com um partido arquitetônico, o espaço de soluções é reduzido, e a forma otimizada apresenta semelhanças formais com a forma de origem (partido arquitetônico). Se for inicial de uma geometria básica, a forma que resulta pode apresentar uma morfologia diferente. Porém ainda mantém um "padrão genético" comum.

5.5.1.5 Forças

Nesta seção foram feitas análises comparativas das principais forças utilizadas para a geração da forma das unidades-caso (Quadro 5.44). Note-se que a carga estrutural e o programa foram as principais forças utilizadas na geração da forma. A carga estrutural, por ser empregada em todas as unidades-caso estudadas, mostrou-se ser o principal fator de desempenho para a geração da forma utilizando processos digitais.

Quadro 5.44 Principais forças usadas na geração da forma

Nº	Unidades-casos	Forças					Construtibilidade
		Carga estrutural	Programa	Perspectiva do lugar	Luz natural	Acústica	
1	Louvre Abu Dhabe	X			X		X
2	Extensão da Hochschule für Technik	X	X	X			
3	Smithsonian Courtyard Enclosure	X	X		X	X	X
4	Rolex Learning Center (EPFL)	X	X	X			
5	Primeiro Piso da Torre Eiffel	X	X				X
6	Qatar National Convention Center	X	X				

Fonte: Autoria própria

Das forças empregadas como desempenho no processo de otimização e geração da form, aquelas consideradas como quantificáveis (carga estrutural, luz natural, acústica, térmica) por poderem ser transformadas em dados numéricos, foram utilizadas diretamente nos programas computacionais, como dados de entrada (Quadro 5.44). As forças, por exemplo, o programa e a perspectiva do lugar, por serem forças não quantificáveis, foram consideradas como regras, restrições ou condicionantes nos programas computacionais de geração e otimização da forma. As regras, restrições ou condicionantes, reduzem o espaço de soluções que possivelmente poderiam ser geradas ou otimizadas. O Quadro 5.45 mostra o perfil das forças usadas como desempenhos no processo de otimização e geração da forma dos edifícios estudados. As forças R são as regras, restrições ou condicionantes. As forças D são os dados que entram diretamente nos programas computacionais de geração da forma.

No projeto do Rolex Learning Center, por exemplo, as limitações do programa e a perspectiva do lugar (valorização das visuais), associadas a uma forma inicialmente estabelecida num partido arquitetônico, resultaram num processo de geração da forma que, em vez de usar um processo de “encontrar a forma” (*form finding*), usou um processo de busca de uma condição ótima de desempenho para uma morfologia dada (TESSMANN, 2008). Nesse caso, o método utilizado para a otimização da forma baseou-se essencialmente na carga estrutural, condicionada pela geometria, pelo programa e pela perspectiva do lugar, que apareciam como restrições e regras que o processo de otimização deveria seguir.

Quadro 5.45 Perfil das forças utilizadas nos modelos performativos

Nº	Unidades-casos	Perfil das forças						
		Carga estrutural	Programa	Perspectiva do lugar	Luz natural	Acústica	Térmica	Construtibilidade ^e
1	Louvre Abu Dhabe	D			D		D	
2	Extensão da Hochschule für Technik	D	R	R				
3	Smithsonian Courtyard Enclosure	D	R		D	D		R
4	Rolex Learning Center (EPFL)	D	R	R				
5	Primeiro Piso da Torre Eiffel	D	R				R	D
6	Qatar National Convention Center	D	R					

Fonte: Autoria própria

A importância dada a cada uma das forças no processo de geração da forma variou de acordo com as unidades-caso. A carga estrutural era a principal força usada na geração da forma. Nos projetos do Smithsonian Courtyard Enclosure e do Louvre Abu Dhabe, outras forças também tiveram pesos semelhantes. No projeto do Qatar National Convention Center, a carga estrutural era considerada a principal força empregada.

5.5.1.6 Técnicas

O Quadro 5.46 mostra as principais técnicas de geração da forma utilizadas nos estudos de caso. Quatro técnicas aparecem em todos os estudos de caso: modelagem paramétrica, prototipagem, scripting e análise de elemento finito. A modelagem paramétrica utilizou-se principalmente nos estágios de representação e geração da forma, e estava ligado aos mecanismos de otimização e geração. A prototipagem, que era utilizada exclusivamente na representação, esteve presente em todos os estudos de caso e serviu para avaliações parciais durante os diversos estágios de amadurecimento da forma.

Embora o scripting não esteja associado a uma técnica específica, mas sim a uma habilidade, em diversas situações de projeto, empregaram-se os scripts associados a programas computacionais para geração, avaliação (simulação), otimização/desempenho e mesmo representação da forma. O script foi considerado como uma técnica essencial. A Análise de Elemento Finito (FEA) foi utilizada nos estágios de avaliação (com análise e simulação) e serviu como dado de entrada na otimização/desempenho.

O algoritmo genético também foi comum nos estudos de caso. Três estudos de caso utilizaram algoritmo genético. No desenvolvimento do projeto do Qatar National Convention Centre, utilizou-se uma técnica também evolucionária, mas denominada BESO, baseada num algoritmo evolucionário.

Quadro 5.46 Principais técnicas usadas no processo de geração da forma digital

Aplicação	Técnicas	Estudos de Casos					
		1 Louvre Abu Dhabe	2 Extensão da Hochschule für Technik	3 Smithsonian Courtyard Enclosure	4 Rolex Learning Center (EPFL)	5 Primeiro Piso da Torre Eiffel	6 Qatar National Convention Center
Geração	Modelagem paramétrica	X	X	X	X	X	X
	Algoritmo genético	X	X			X	
Representação	Prototipagem	X	X	X	X	X	X
	Geometry Method Statement			X			
Avaliação	Bi-directional Evolutionary Structural Optimization						X
	Análise Sensitiva				X		
Otimização /Desempenho	Análise de Elemento Finito	X	X	X	X	X	X
	Dinâmica de Fluidos Computacionais	X					
	Algoritmo de Otimização estrutural	X					
	Thermal Analysis			X			
	Simulated annealing					X	
	Scripting	X	X	X	X	X	X

Fonte: Autoria própria

5.5.1.7 Ferramentas Computacionais

Nesta seção, apresentam-se as principais ferramentas computacionais empregadas na geração da forma das unidades-caso (Quadro 5.47). Ao lado de cada ferramenta, indicam-se os estágios do ciclo de decisão em que essas ferramentas foram utilizadas. Classificam-se essas ferramentas de acordo com os seguintes estágios: geração, representação, avaliação (simulação), otimização/ desempenho e fabricação.

Quadro 5.47 Relação de softwares mais utilizados no processo de geração da forma

Área de Aplicação	Software	Estudos de Casos					
		1	2	3	4	5	6
		Louvre Abu Dhabi	Extensão da Hochschule für Technik	Smithsonian Courtyard Enclosure	Rolex Learning Center (EPFL)	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Qatar National Convention Center
Geração	Rhino 3D + Grasshoper + Programa	X	X		X	X	
	Rhino 3D	X	X		X	X	
Representação	Digital Projects (CATIA)	X					
	Generative Components + Programa em VBA			X			
Avaliação	Geometry Method Statement			X			
	Vectorworks				X		
Otimização/ Desempenho	3D MAX					X	
	AutoCAD					X	
	Ansy	X		X			
	SMART Sizer	X					X
	SMART Form	X					X
	Multi-objetive optimization	X					
	Sofistik		X		X		
	Ecotect			X			
	ODEON			X			
	RSTAB				X		
	GSA					X	
	HOME MADE (RFR)					X	
	HOME MADE (SASAKI)						X
	Fabricação	Mechanical Desktop + Programa em AutoLISP			X		
Rhino				X			

Nota: Também se utilizaram dois softwares na fabricação. No caso do Projeto da Entrada do Qatar National Convention Center, não foi possível encontrar com precisão os softwares usados, portanto, não foram indicados no quadro

Fonte: Autoria própria

Os softwares utilizados no momento inicial de concepção para a realização de esboços foram: Rhino 3D (presente em cinco unidades-caso), AutoCAD (em uma unidade-caso), 3D Max (em uma unidade-caso). Na etapa de geração da forma, propriamente dita, o software mais utilizado foi o Rhino 3D + Grasshoper associado a um programa desenvolvido para a geração da forma. Essa solução foi utilizada em quatro estudos de caso. No projeto do Smithsonian

Courtyard Enclosure, utilizou-se o Generative Components associado a um programa em VBA, em todos os estágios do projeto. Para a modelagem digital, utilizou-se o Vectorworks (em uma unidade-caso) e o Digital Projects (em uma unidade-caso).

Nos estágios de Avaliação/Simulação e Otimização/ Desempenho, utilizou-se uma variedade grande de softwares. A principal solução utilizada em quatro unidades-caso foi o Rhino + Grasshoper associado a um programa desenvolvido especialmente para cada projeto. Programas como o Ansy foram utilizados em duas unidades-caso. Várias soluções próprias de software foram desenvolvidas pelos escritórios para a resolução de problemas sofisticados de projeto. O escritório Buro Happold, por exemplo, desenvolveu os softwares SMART Sizer e SMART Form, que são soluções também comercializadas.

As análises do Quadro 5.47 mostram que todas as unidades-caso caracterizaram-se pelo desenvolvimento de soluções computacionais que exigiram do profissional capacidade avançada em programação computacional, seja na customização de softwares disponíveis no mercado, seja no desenvolvimento de novas ferramentas computacionais. Em muitas situações a solução gerada só foi possível graças ao uso de novos softwares desenvolvidos dentro do escritório (ou em parceria com universidades) para resolução de projetos vinculados à otimização da forma.

5.5.1.8 Interoperabilidade

Durante os estudos de caso, observou-se que um dos principais problemas em termos de interoperabilidade ocorreu na passagem do modelo do software utilizado na geração da forma para o software de modelagem digital da informação do edifício. Dos estudos de caso, apenas um deles, o projeto do Smithsonian Courtyard Enclosure, utilizou programa único (Quadro 5.48). Nesse caso, todo o modelo digital desenvolveu-se em um único programa em VBA dentro Generative Components, durante todo o processo de projeto. Os demais projetos utilizaram mais de uma plataforma para geração da forma e desenvolvimento do modelo. Na maioria dos casos, o fluxo de informações durante o processo de projeto ocorreu de modo liso, com poucas perdas de informação.

Quadro 5.48 Perfil da interoperabilidade nos estudos de caso

Interoperabilidade	Estudos de casos					
	1	2	3	4	5	6
	Louvre Abu Dhabi	Extensão da Hochschule für Technik	Smithsonian Courtyard Enclosure	Rolex Learning Center (EPFL)	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Qatar National Convention Center
Uso de plataforma única (fechada)			X			
Uso de várias plataformas	X	X		X	X	X

Fonte: Autoria própria

Um problema comum de interoperabilidade ocorria entre as etapas de projeto e construção. Nessa situação o projeto do Smithsonian Courtyard Enclosure levou vantagem pelo fato de estar trabalhando em uma plataforma única integrada com a produção por meio de um software desenvolvido no escritório de Foster + Partners, denominado de Geometry Method Statement com Mechanical Desktop associado a um programa em AutoLISP. Dessa forma, foi possível transferir as informações diretamente do modelo digital para um modelo utilizado na confecção das peças do edifício. Em outros estudos de caso, a interoperabilidade entre os modelos gerados na etapa de projeto e os modelos para a produção nem sempre foram bons o suficiente para a não necessidade de retrabalhos.

Com o uso de softwares como o Rhino + Grasshopper, por exemplo, foi possível substituir a tarefa de reconstrução de modelos para a de desenvolvimento de algoritmos que pudesse servir para transformar o modelo num formato utilizado na produção. Nesses casos, conforme afirma Scheurer (2010), o que ocorreu não foi uma supressão de trabalho, e sim uma mudança para um alto nível de abstração, com a substituição da tarefa de modelagem do modelo para a de programação.

O que se observou nos estudos de caso é que o principal meio utilizado para tornar eficiente a troca de informações do modelo era pela utilização de uma mesma plataforma entre os diferentes profissionais. A automatização de sequências de decisões, em certas etapas do processo de projeto, só foi possível graças à existência de um fluxo contínuo de informações, sem interrupção, entre dois ou mais softwares. Um exemplo foi o uso do Rhino + Grasshopper para o projeto de arquitetura e de estrutura. Em certas situações de projeto de grande

complexidade, conforme afirmou Leduc (informação verbal), o escritório RFR utiliza a mesma plataforma empregada pelo escritório de arquitetura como meio de tornar o processo de projeto mais eficiente, reduzindo as perdas de informações.

O escritório Buro Happold, por exemplo, tem desenvolvido, nos últimos anos, aplicativos que permitem a integração de otimização ambiental, projeto (arquitetônico, estrutura e ambiental) e fabricação, de modo a tornar as soluções completamente integradas e desenvolvidas sob uma plataforma BIM. Essas soluções foram usados no desenvolvimento dos projetos do Louvre Abu Dhabe e do Sidra Trees.

Os principais formatos utilizados na troca de informação entre os modelos e na documentação foram: 3DS, 3DM, DWG, DXF, DOJ, PDF, XLS, STL e IFC.

5.5.1.9 Colaboração

Em todos os estudos de caso, a colaboração foi algo que ocorreu de modo sistêmico no processo de projeto, contribuindo decisivamente com a geração da forma. Em alguns projetos, a colaboração entre equipes de engenharia e arquitetura eram iniciadas ainda na etapa conceitual (Quadro 5.49), em fase anterior às discussões sobre forma. Nos outros, a colaboração ocorre no estágio de concepção arquitetônica, quando as intenções formais começam a aparecer. Em muitos casos, a colaboração se estendeu não apenas entre projetistas e consultores especializados, mas, também, entre consultores, construtores, fabricantes, etc.

Quadro 5.49 Perfil da colaboração

Colaboração	Estudos de casos					
	1	2	3	4	5	6
	Louvre Abu Dhabe	Extensão da Hochschule für Technik	Smithsonian Courtyard Enclosure	Rolex Learning Center (EPFL)	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Qatar National Convention Center
Etapa conceitual (anterior à forma)	X	X				X
Concepção arquitetônica			X	X	X	

Fonte: Autoria própria

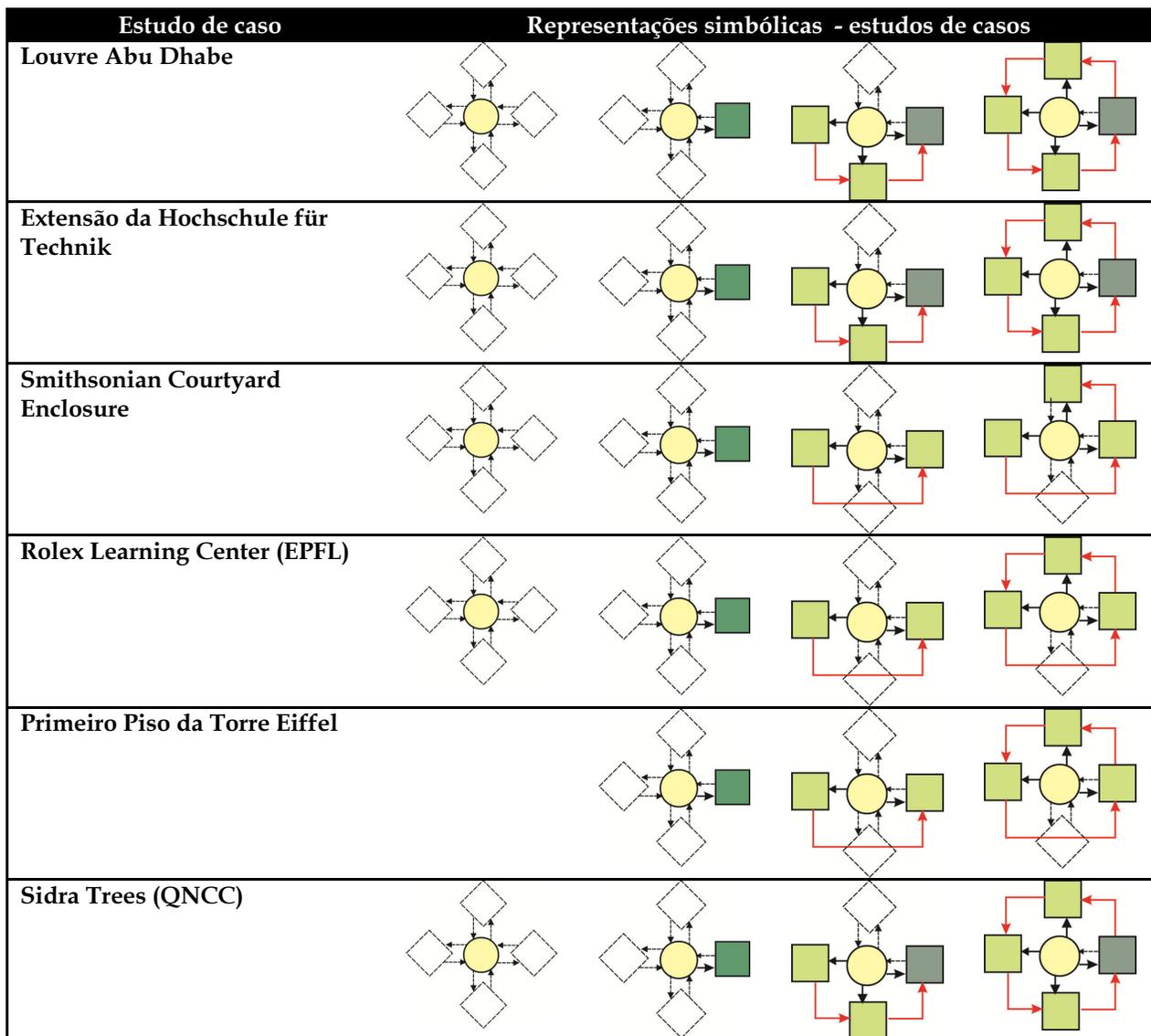
A colaboração intensa entre projetistas durante o processo de geração da forma indica uma nova relação de autoria da forma. A forma arquitetônica nessa realidade deixa de ser de propriedade do arquiteto para ser resultado de um processo colaborativo entre projetistas, que, com base nos seus conhecimentos (de várias especialidades), e buscando a otimização de certos desempenhos, geram a forma. Mesmo assim, o arquiteto ainda tem um papel primordial na definição conceitual dos elementos que vão definir o projeto e interferir diretamente na forma. Nessa realidade o arquiteto passa a dar prioridade à topológica em vez da tipologia; e ao conceito em vez da forma.

5.5.1.10 Automação

Tendo como base a representação simbólica de esquema básico de modelo de projeto digital proposto por Oxman (2006), fez-se um mapeamento das características gerais dos tipos de interação entre projetistas e componentes do projeto digital durante o processo de geração da forma das unidades-caso (geração, representação, avaliação, otimização/desempenho), suas propriedades (implícitas e explícitas) e suas relações (fluxo de informação e perfil da interação). O Quadro 5.50 mostra as representações simbólicas utilizados no processo de geração da forma identificados nos estudos de caso e relaciona sua ocorrência em cada uma das unidades-caso.

Nas situações em que existe uma ligação explícita com um fluxo de informação automático, entre todos os componentes do projeto digital, o processo torna-se automatizado e a interação do projetista deixa de ser com um meio não digital, com um esboço digital, com um desenho digital (projeto baseado no CAD) ou com um modelo digital (projeto baseado num modelo de informação da construção, usando um software de autoria BIM), e passa a ser com uma representação digital gerada por um mecanismo (nesse caso o projetista interage com uma estrutura digital gerada por um mecanismo de acordo com um grupo de regras ou relações predefinidas), ou por um ambiente digital que gera um mecanismo digital (nesse caso o projetista interage com um mecanismo computacional que gera uma representação digital). Esse caso é representado pelo modelo número 7 do Quadro 5.50.

Quadro 5.50 Modelos de projetos digital identificados nos estudos de caso



Fonte: Autoria própria

Nos modelos 3, 4, 5 e 6 do Quadro 5.50, a sequência de decisões ocorreu de modo semiautomatizado, pois o fluxo da informação entre os componentes, durante uma sequência de decisões, não era completamente automatizado e a interação do projetista com um componente (modelo 4, 5 e 6) ou dois componentes (modelo 3) se deu de modo manual, por meio de uma interação implícita, baseado num conhecimento não formalizado. Nesses casos, foram implícitas as interações: projetista e a avaliação e geração – no modelo 3; projetista e avaliação – no modelo 4; projetista e geração – no modelo 5 e 6. A diferença do modelo 5 para o 6 é que no primeiro não existia uma ligação explícita entre a avaliação e otimização.

Nos modelos 1 e 2, a sequência de decisões ocorreu de modo manual, pois não existiu nenhum tipo de ligação explícita entre dois ou mais componentes do projeto digital. No modelo 1, a sequência de decisões baseou-se num conhecimento implícito por meio de uma interação direta do projetista com as quatro classes de componentes das atividades de projeto tradicionais. No modelo 2, a interação do projetista com a representação se deu com a construção digital, que podia ser um esboço digital, um desenho digital ou um modelo digital.

Além das sequências de decisões automatizadas, presentes em alguns dos estudos de caso, observou-se que em todos os projetos estudados foram encontradas sequências semiautomatizadas e manuais. Diante dessas observações, conclui-se que os processos de geração da forma são essencialmente semiautomatizados, com sequências de decisões automatizadas (em alguns casos), sequências manuais e sequências semiautomatizadas. Observou-se, também, que essas sequências não ocorrem de modo sistematizado, mas sempre se iniciam com uma sequência manual; em seguida, podem ocorrer sequências manuais, semiautomatizadas ou automatizadas, sem uma ordem preestabelecida.

Essa complexidade identificada nos ciclos de decisão dos projetos performativos, foi o modo encontrado pelos projetistas de contemplar a resolução de diferentes problemas de projeto e níveis de conhecimento em um sistema que fosse capaz de gerar soluções inéditas e inovadoras, por meio da programação computacional. Ao mesmo tempo, sem deixar de lado a sensibilidade e a capacidade humana em resolver intuitivamente problemas de maior complexidade, de uma maneira implícita, ainda pouco conhecida, mas que é base do saber arquitetônico que se tem até hoje.

5.5.1.11 As Classes dos Modelos Performativos

Com as análises efetuadas nos estudos de caso, realizou-se um estudo comparativo das principais categorias de avaliação identificadas nas unidades-caso. O Quadro 5.51 sintetiza algumas das principais características dos métodos empregados na geração da forma das unidades-caso.

Quadro 5.51 Categorias presentes nos métodos estudados nos estudos de caso

Categorias de análises	Métodos					
	método 1	método 2	método 3	método 4	método 5	método 6
	Louvre Abu Dhabi	Extensão da Hochschule für Technik	Smithsonian Courtyard Enclosure	Rolex Learning Center (EPFL)	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Qatar National Convention Center
Técnicas	MP	MP	MP	MP	MP	MP
	PT	PT	PT	PT	PT	PT
	FEA	FEA	FEA	FEA	FEA	FEA
	SCP	SCP	SCP	SCP	SCP	SCP
	GA	GA			GA	
	CFD		GMS	AS	SA	BESO
	SOA					
Forças (geração)	CE	CE	CE	CE	CE	CE
	LN		LN			
	TM					
			AC			
					CT	
Forças (regra, restrição)	PR	PR	PR	PR	PR	PR
		PL		PL		
					TM	
Uso	lazer	educação	lazer	educação	comércio	lazer
Porte	grande	pequeno	pequeno	grande	pequeno	grande
Escala	cobertura	global	cobertura	global	fachada	cobertura
Forma inicial	básica	básica	partido	partido	partido	básica
Geometria	híbrida	híbrida	forma livre	encontrar a forma	forma livre	encontrar a forma
Interoperabilidade	vários ambientes	vários ambientes	ambiente único	vários ambientes	vários ambientes	vários ambientes
Colaboração	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Geração forma	geração	otimização	otimização	otimização	geração	geração
Processo	semi-automático	semi-automático	semi-automático	semi-automático	semi-automático	semi-automático
Seqüência decisão	automático	automático	semi-automático	semi-automático	semi-automático	automático

Nota: TÉCNICAS: MP- modelagem paramétrica; PT - prototipagem; FEA - análise de elemento finito; SCP - scripting; GA - algoritmo genético; CFD - dinâmica de fluidos computacionais; SOA - algoritmo de otimização estrutural; GMS - geometry methodo statement; AS - análise sensitiva; SA - simulated annealing; BESO - bi-directional evolutionary structural optimization.) (FORÇAS: CE - carga estrutural; LN - luz natural; TM - térmica; AC - acústica; CT - construtibilidade; PR - programa; PL - perspectiva do lugar.)

Fonte: Autoria própria

Os processos de geração das formas dos edifícios apresentados nos estudos de caso desenvolveram-se guiados por desempenhos desejados, que serviam como motores na formação da geometria do edifício. Por esse motivo, são exemplos reais do modelo de projeto digital

denominado por Oxman (2007) como Modelo Performativo. O que se observou nos estudos de caso é que diferentes métodos de geração da forma foram utilizados sob a égide do Modelo Performativo. Esses métodos caracterizavam-se pelo uso de certas técnicas e ferramentas, de certos tipos de forças e eram iniciados tendo como base uma forma inicial definida por um partido arquitetônico (ainda preliminar) ou uma forma básica, que inspirava a geração da forma do edifício.

Por esses métodos apresentarem uma variedade de características, buscou-se classificá-los em subclasses do Modelo Performativo. O ponto de partida foi a seleção das categorias mais importantes e o agrupamento delas de acordo com certas similaridades (Quadro 5.52). Observou-se que categorias como o uso, o porte e a escala do edifício não importavam para a classificação dos modelos digitais, portanto, foram desconsiderados. Com relação ao desempenho desejado, observou-se que em todos os métodos a carga estrutural estava entre as principais forças que conduziam o processo de formação. A carga estrutural estava em forma de dado de entrada numérico presente nos softwares de otimização e geração da forma. Outro desempenho desejado era o programa arquitetônico. Este estava em forma de regras, restrições ou diretrizes, que iriam orientar a condução do processo de formação. Em todos os casos, observa-se que o desempenho desejado era o condutor do processo de formação, que ocorria com ciclos automatizados (em alguns métodos), semiautomatizados e manuais.

Técnicas como Algoritmo Genético (GA) utilizaram-se em 50% dos métodos. Nos métodos 4 e 5, utilizou-se o GA com os Métodos de Elementos Finitos (FEM) e serviam para a otimização da forma dentro de um processo constituído por sucessivas iterações. No método 4, por exemplo, associava-se à técnica denominada análise sensitiva, que visava chegar a uma forma estrutural ótima tendo como base uma forma de referência. Por outro lado, nos métodos 1 e 2, o GA se associava ao processo evolucionário de geração da forma. No método 6, utilizou-se uma técnica também evolucionária (BESO), que buscava a geração da mais eficiente forma de estrutura tridimensional por meio de certas dimensões e das condições de cargas aplicadas.

Quadro 5.52 Classificação dos modelos performativos por meio das características dos métodos

Categorias de análises	Modelos Performativos					
	Sub-classe 1			Sub-classe 2		
	método 3	método 5	método 4	método 1	método 6	método 2
	Smithsonian Courtyard Enclosure	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Rolex Learning Center (EPFL)	Louvre Abu Dhabi	Qatar National Convention Center	Extensão da Hochschule für Technik
Técnicas		GA	GA	GA		GA
	GMS	SA	SAM	SOA	ESO	
Forças (geração)	CE	CE	CE	CE	CE	CE
Forças (regra, restrição)	PR	PR	PR	PR	PR	PR
Processo	semi-automático	semi-automático	semi-automático	semi-automático	semi-automático	semi-automático
Seqüência decisão	semi-automático	semi-automático	semi-automático	automático	automático	automático
Geração forma	otimização	otimização	otimização	geração	geração	geração
Forma inicial	partido	partido	partido	básica	básica	básica

Fonte: Autoria própria

Visando estabelecer uma divisão mais precisa das duas subclasses apresentadas no Quadro 5.52, fez-se uma nova classificação delas com base nas similaridades e diferenças, apresentado no Quadro 5.53. O que se observou foi que os métodos 3, 4 e 5 são métodos de otimização (transformação, mudança) de uma forma preestabelecida num partido arquitetônico. Os métodos 1, 2 e 6 são essencialmente métodos generativos. Por meio de diretrizes formais, expressas por certas formas básicas, mecanismos guiam o processo de geração da forma visando um desempenho desejado.

Com base nessa classificação, é possível definir claramente as duas subclasses de Modelo de Projeto Performativo, que neste trabalho se denominaram Modelo Performativo Baseado na Otimização e Modelo Performativo Baseado na Geração. No primeiro, o Modelo Performativo pode ser considerado como um modelo de otimização. A forma final do edifício é resultado de requisitos de desempenho em vez de preferências formais predefinidas. Estas se encontram (otimizadas, modificadas, transformadas) mediante requisitos de desempenho.

Quadro 5.53 Classificação dos modelos performativos proposta por este trabalho

Modelos Performativos						
Categorias de análises	manual ← formação → automática					
	Modelo Performativo Baseado na otimização			Modelo Performativo Baseado na Geração		
	Otimização			Geração		
	método 3	método 5	método 4	método 1	método 6	método 2
	Smithsonian Courtyard Enclosure	Primeiro Piso da Torre Eiffel	Rolex Learning Center (EPFL)	Louvre Abu Dhabi	Qatar National Convention Center	Extensão da Hochschule für Technik
Seqüência decisão	semi-automático	semi-automático	semi-automático	automático	automático	automático
Geração forma	otimização	otimização	otimização	geração	geração	geração
Forma inicial	partido	partido	partido	básica	básica	básica

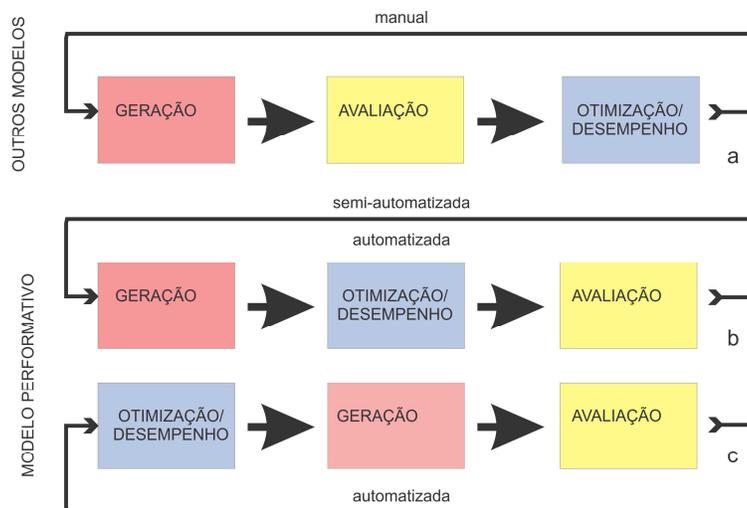
Fonte: Autoria própria

No Modelo Performativo Baseado na Geração, dados de simulação de desempenho guiam os processos de formação do objeto de modo a gerar uma nova forma por meio de uma forma previamente estabelecida. Nesse caso, durante sequências de decisão, o projetista vai interagir com mecanismos digitais que vão definir a forma (geração, com base em uma forma de referência), representá-la digitalmente, avaliá-la e otimizá-la, por meio dos módulos geração, representação, avaliação e otimização/desempenho. É um processo que inclui ciclos completamente automatizados.

No Modelo Performativo, ocorre uma mudança na estrutura de projeto que passa de um processo de Geração > Avaliação > Otimização/ Desempenho para um processo que antecipa a otimização (Figura 5. 57). Em vez de avaliar uma forma gerada e modificá-la de acordo com os resultados da avaliação (Figura 5. 57a), no Modelo Performativo o desempenho interfere diretamente na formação do projeto, seja modificando/ transformando uma forma previamente definida, no Modelo Performativo Baseado na Otimização (Figura 5. 57b), seja gerando uma forma nova, com uma geometria básica, no Modelo Performativo Baseado na Geração (Figura 5. 57c). No Modelo Performativo Baseado na Otimização, o processo de projeto apresenta ciclos

semiautomatizados, pois a geração ocorre manualmente, no estágio inicial, e depois é otimizado, transformado, modificado. No Modelo Performativo Baseado na Geração, o processo de projeto apresenta ciclos completamente automatizados. Nesse caso, dados de simulação de desempenho guiam um mecanismo de geração digital que gera uma forma completamente nova.

Figura 5. 57 Modelos de projeto digital



Nota: a) modelo convencional CAD; b) modelo performativo baseado na otimização; c) modelo performativo baseado na geração

Fonte: Adaptado de Oxman (2007)

5.6 Discussão Final

As análises exaustivas nos estudos de caso apresentados neste capítulo permitiram demonstrar que no Modelo Performativo o desempenho é o motor na formação da forma arquitetônica, otimizando a forma no Modelo Performativo Baseado na Otimização e gerando novas formas no Modelo Performativo Baseado na Geração. Essa alteração na estrutura do projeto implica em profundas mudanças no modo de agir dos projetistas. Eles precisam abdicar, em algumas situações, de preconceitos e atitudes criacionistas em favor do uso do desempenho como guia na geração da forma e do espaço da arquitetura. Nesse contexto, a geração da forma passa a ser uma tarefa essencialmente colaborativa, com a participação efetiva de diferentes equipes no processo de geração da forma do edifício.

Com base na caracterização e classificação dos métodos de projeto baseados no Modelo Performativo, o próximo capítulo proporá uma Estrutura Conceitual de um modelo de projeto digital performativo.

6 **MODELO PERFORMATIVO: Estrutura Conceitual**

6.1 Introdução

O Capítulo 5 realizou estudos de caso em projetos concebidos sob a égide dos Modelos Performativos. Nesses estudos de caso foi possível compreender métodos, técnicas e ferramentas utilizados. Também foi possível identificar algumas das principais mudanças nas metodologias, no perfil do projeto e na forma de produção dos projetos concebidos sob essa emblemática classe de projeto digital.

Visando estabelecer distinções metodológicas relacionadas com essa prática, este capítulo cria uma estrutura teórica e conceitual dos modelos digitais concebidos sob o paradigma do projeto performativo. Baseado na análise da prática de projeto e apoiado numa revisão dos conceitos de processos de projeto (BROADBENT, 1971, 1973; MARKUS, 1971), estágios de decisão (LAWSON, 2005) e os modelos conceituais de projeto digital proposto por Oxman (2006, 2007, 2008a, 2008b, 2009a, 2009b), estabeleceu-se uma estrutura funcional capaz de representar uma sintaxe do modelo de projeto digital performativo. Para isso, foi proposta uma Estrutura Conceitual de metodologia de projeto digital performativo. Essa estrutura teve o objetivo de definir e explicar algumas das principais características de uma classe de projeto digital concebido sob o âmbito do desempenho. Essa estrutura conceitual também visou servir como um instrumento metodológico para o mapeamento das relações entre os projetistas, o meio digital, o perfil da colaboração e o tipo de habilidade requerida para esse tipo de prática.

O modo utilizado de estabelecer a estrutura conceitual de metodologia de projeto digital performativo foi por meio da definição das características e propriedades do processo de projeto

e das sequências de decisão. Isso se deu com a identificação dos elementos, ligações e relações existentes entre os projetistas e os componentes do projeto digital durante o processo de projeto e as sequências de decisão baseadas na prática digital performativa.

Para isso, este capítulo inicia-se com a identificação do momento em que o projeto passa a ser digital e a caracterização das estruturas do projeto digital. Dessa forma, estabelece-se um limite entre a prática não digital e a digital durante o processo de geração da forma. Na etapa seguinte, propõe-se um modelo de relação entre processo de projeto e sequências de decisão. Em seguida, mostra-se que a sequência de decisão pode ser expressa pela representação de modelo de projeto digital proposto por Oxman (2006). Apresenta-se a estrutura dos modelos de projeto digital proposto por Oxman (2006) e mostra-se que outras múltiplas representações simbólicas estão presentes na prática de projeto performativo. Essas múltiplas representações são mapeadas no processo de projeto. Identifica-se o perfil do fluxo de informação do projeto digital performativo e propõe-se um modelo conceitual de projeto digital. Para finalizar, apresentam-se diferentes conceitos de desempenho e demonstra-se que os processos de projeto digitais performativos coexistem com outros modelos digitais, em uma mesma prática de projeto. Com isso, demonstra-se que o processo de projeto digital performativo caracteriza-se por uma estrutura composta por múltiplos modelos.

6.2 Geração Digital da Forma e espaço de soluções

Na execução e na conclusão do programa arquitetônico, os arquitetos desenvolvem imagens mentais de forma, espaço e função. Constroem-se essas imagens com base em conceitos, ideologias, filosofias de vida, repertórios e por meio de discussões com outros projetistas e outros agentes. Após um momento inicial de projeto, em que muitas opções de partidos arquitetônicos podem ser adotadas, passasse a pensar em espaços de solução. O universo de opções que aparentemente era ingente (“infinito”) passa a ser limitado por certas imagens mentais, que podem ter uma infinidade de variações, mas que estão circunscritos num espaço de soluções.

Depois de definidas as imagens mentais de uma proposta de projeto, são necessárias técnicas e ferramentas para descrever, comunicar, fundamentar e aperfeiçoar essas imagens

mentais, que são representações de um ideário ou conceito de projeto. Nesse momento, o projetista utiliza uma série de procedimentos representados nos métodos, técnicas e ferramentas (TESSMANN, 2008). Esse processo ocorre em ciclos que se repetem, gerando soluções semelhantes às anteriores ou conduzindo para novas soluções considerando-se aquelas ideias iniciais. Reduz-se o universo de opções de projeto e passa-se a trabalhar com espaço de soluções.

Os métodos podem abranger uma ampla variedade de processos, que vão desde sistemas altamente formalizados, como procedimentos para cálculos de elementos estruturais, até procedimentos menos formais, como os métodos tradicionalmente (não digitais) utilizados na geração de formas arquitetônicas.

Procedimentos de projetos formais estão relacionados a sistemas formais. Esses sistemas se constituem em linguagens formais e em uma série de regras de inferências; formam um sistema dedutivo que pode ser utilizado para derivar novas expressões por meio de expressões existentes. Num sistema formal, tudo que está fora dele é considerado irrelevante. Novas descobertas podem ocorrer com base em expressões conhecidas por uma aplicação prática de regras. Ao mesmo tempo, sistemas formais se baseiam em estruturas que não podem ser ultrapassadas. Assim, procedimentos de projeto baseados em sistemas formais implicam projetar apenas aquilo que pode ser calculado dentro de um sistema de regras estabelecido (TESSMANN, 2008). O que estiver fora não pode ser incluso como opção.

Assim como na Cibernética – em que uma simples e linear relação causa-efeito é substituída por um sistema circular, controlado não apenas por entradas externas, mas por outras – na atividade de projeto ao se buscar metas particulares de solução, elas vão influenciar e realimentar o sistema na busca de novas explorações. Ambos os sistemas são descritos como processos recursivos compostos por etapas de análise, síntese e avaliação (TESSMANN, 2008). No projeto arquitetônico, é necessário incorporar complexos requisitos funcionais e organizacionais por meio de uma negociação recorrente de análise das soluções existentes e, ao mesmo tempo, geração e avaliação de possíveis respostas. Conhecimentos adicionais, resultados desses processos iterativos, podem exigir análises mais profundas do contexto específico ou ajustes dos objetivos previamente definidos (LAWSON, 2005).

Procedimentos baseados no uso de algoritmos, tradicionalmente, constituem-se em uma cadeia causal inequívoca que, segundo Trogemann *et al.* (2005, *apud* TESSMANN, 2008), parece

não ter o potencial criacionista necessário para o processo de tomada de decisões em arquitetura. Apesar da condição inicial ou parâmetro de entrada, todas as perguntas têm uma resposta direta de acordo com a estrutura do algoritmo, que atua como uma máquina trivial (VON FOERSTER, 1970). Nesses casos, máquinas triviais associam uma entrada específica a uma saída correspondente. Logo, a relação é determinística, previsível e analisável por um observador (TESSMANN, 2008). Um exemplo eficiente de uso de máquinas triviais está na resolução de problemas estruturais. Por se basearem no mundo real, os projetos estruturais precisam ser previsíveis de modo a fornecer respostas corretas sobre o comportamento estrutural. Esse sistema universal, definido por uma mecanização, formalização e lógica dentro de um sistema coerente, é a expressão máxima de um pensamento racionalista que representa a tradição científica.

Em situação diametralmente oposta a esse tipo de estrutura, os sistemas não triviais têm a capacidade de mudar seu estado interno durante a execução. Eles incorporam ao algoritmo pelo menos uma regra de segunda ordem; ou seja, uma regra ativa é transferida para outra regra que é carregada em outra iteração. Assim como nos sistemas computacionais triviais, nos não triviais, os sistemas são explícitos e claramente definidos; todavia, nesses últimos, seu comportamento de um dado momento é dependente de seu estado anterior. Ainda que o sistema seja determinado pela sua construção, o resultado é imprevisível se o estado interno da máquina for desconhecido (TESSMANN, 2008).

Mecanismos não triviais são sistemas formais não capazes de superar seu quadro, no entanto, não têm uma saída determinada somente pela entrada, mas também por um estado interno do sistema. As respostas não saem até que a máquina passe por todo um ciclo de cálculos. Utilizando-se sistemas computacionais avançados, eles podem ampliar o espaço de soluções possíveis (TESSMANN, 2008).

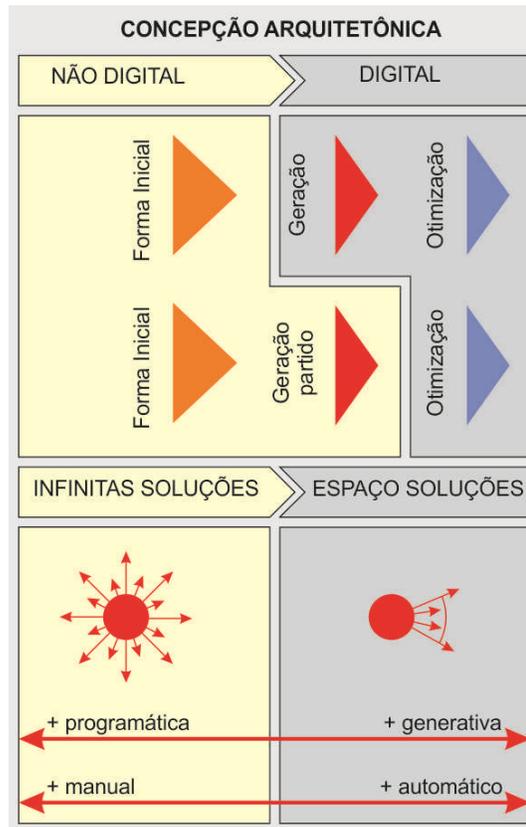
Quando a programação e o *scripting* migraram para o campo da exploração do projeto, esses sistemas não triviais atraíram a atenção (TESSMANN, 2008). Sistemas como Algoritmo Evolucionário, *Neural Networks*, *Cellular Automata*, etc. representam sistemas formais que têm o potencial de gerar um número ilimitado de novas soluções; por isso, não podem ser ignorados como opção de técnica de projeto (TESSMANN, 2008).

Se, por um lado, a construção de imagens mentais – que vão originar uma forma inicial ou um partido arquitetônico – estiver comumente associada a uma prática de projeto não digital, por outro, o uso de sistemas digitais, triviais ou não, baseados em algoritmos, está vinculado a uma fase de projeto em que a forma inicial já foi concebida, e então passa a explorar os espaços de soluções. Nesse momento, o algoritmo pode ter um papel decisivo no sentido de ampliar o espaço de soluções e viabilizar a ereção de novas possibilidades formais, espaciais e funcionais dentro do espaço de soluções.

A Figura 6.1 mostra a distinção na fase de concepção arquitetônica entre o projeto digital (em azul) e o não digital (em bege), para uma prática baseada num modelo performativo. Note-se que, no momento de geração da forma inicial, o modelo é analógico (não digital), não há regras restritivas associadas, o que permite a geração de infinitas possibilidades de solução, com base em imagens mentais geradas pelos projetistas. Esse é um processo mais manual.

Durante o desenvolvimento da concepção arquitetônica, sistemas digitais baseados em algoritmos vão trabalhar com um espaço de soluções gerando uma forma; em seguida, otimizando-a ou otimizando um partido arquitetônico criado analogicamente. Nesse momento sistemas digitais semiautomatizados ou automatizados vão conduzir o processo de geração, com otimização, ou simplesmente com otimização da forma arquitetônica. No início do processo de projeto, os projetistas trabalham com infinitas soluções, ainda muito num nível abstrato e programático. Definido o espaço de soluções, o processo torna-se mais generativo no sentido de encontrar a melhor forma para um determinado problema de projeto.

Figura 6.1 Esquema geral de concepção arquitetônica em projetos baseados no modelo performativo



Fonte: Autoria própria

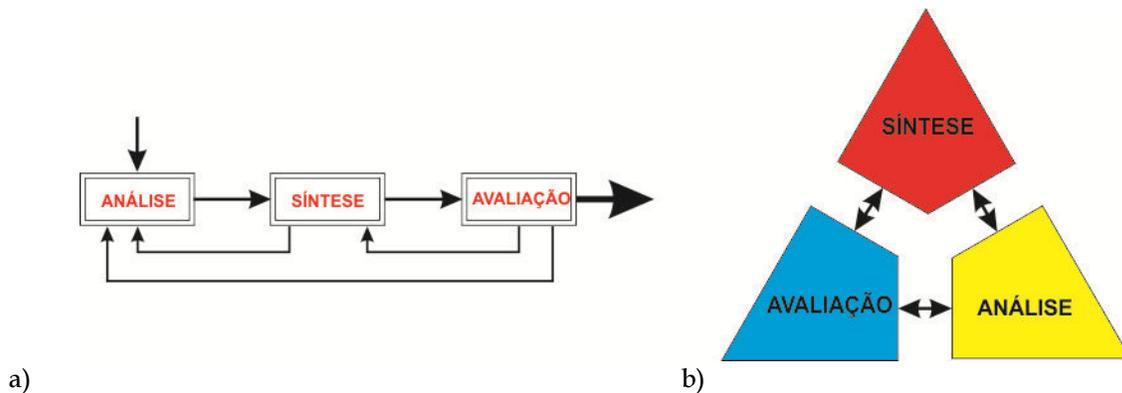
6.3 Modelos de Projeto Digital

Para estabelecer uma Estrutura Conceitual de processo de projeto digital baseado no Modelo Performativo, é importante rever alguns conceitos já apresentados na fundamentação teórica e demonstrar como serviram para estruturar a proposta. Para isso, a seguir, realiza-se uma série de análises e conjecturas, e serão propostas relações entre sequências de decisão, processos de projeto, modelo digital e projetos performativos.

6.3.1 Processo de projeto e sequência de decisões

Conforme apresentado no Capítulo 2, a sequência de decisão é um intervalo no processo de projeto definido por um ciclo que compreende as fases de análise, síntese e avaliação. Lawson (2005) mostra que os modelos de sequência de decisão não podem ser completamente lineares, mas precisam incorporar *feedbacks* e *return loops*, de modo que diferentes estágios de decisão do processo de projeto possam estar articulados (Figura 6.2a). O mesmo autor sugere um modelo mais simplificado em que os componentes da sequência de decisão estão biarticulados (Figura 6.2b). Qualquer um dos componentes pode conectar-se com o outro.

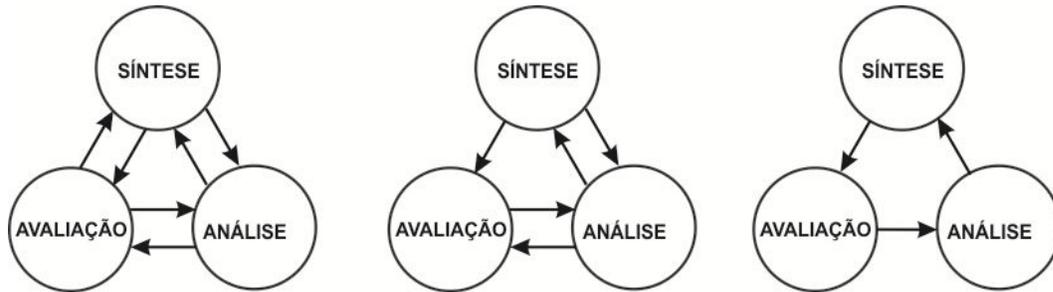
Figura 6.2 Mapas de sequências de decisão: a) mapa generalizado de sequência de decisão b) mapa de sequência de decisão proposto por Lawson (2005).



Fonte: a) Lawson (2005, p. 38); b) adaptado de Lawson (2005, p. 40)

Esse modelo de sequência de decisões utilizado na literatura corresponde a um modelo não digital, com um perfil de interação menos sistêmico. Nos modelos digitais, o que se observa é que a sequência nem sempre é bidirecional. Muitos sistemas formais, que utilizam algoritmos no processo de projeto, desenvolvem sequências de decisões lineares entre duas ou três fases (Figura 6.3); por exemplo, sequências unidirecionais entre geração e avaliação. Nesse caso, o processo apresenta uma lógica diferente da representada por Lawson (2005).

Figura 6.3 Exemplos de possíveis fluxos de informação nas fases de uma sequência de decisão.



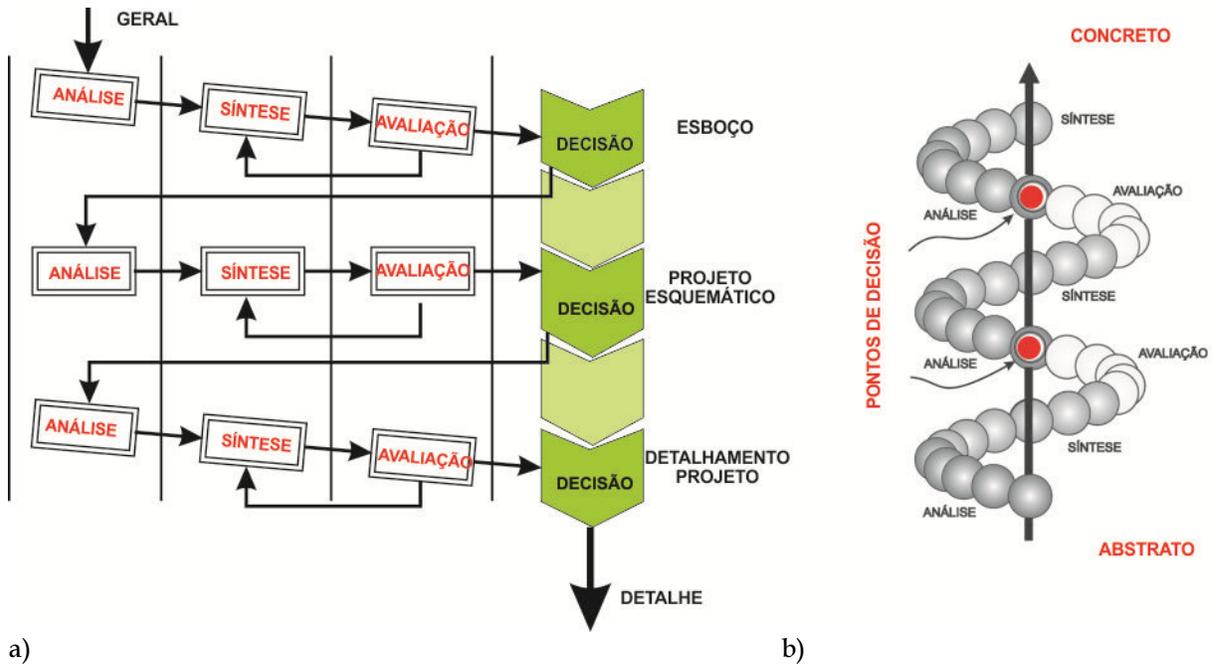
Fonte: Autoria própria

Também no Capítulo 2, define-se o processo de projeto como uma sequência integral de acontecimentos que ocorre desde as primeiras concepções e vai até a finalização do projeto. No processo de projeto, utilizam-se métodos e técnicas no seu desenvolvimento. No Capítulo 2 também é apresentado um modelo de processo de projeto proposto por Markus (1971), com a indicação das várias sequências de decisão (Figura 6.4a). Nesse modelo, o nível de detalhe do projeto cresce durante as sequências de decisão. Uma crítica feita por Lawson (2005) a esse modelo é que nem sempre o projeto parte do geral para o detalhe. Em algumas situações, o projeto pode ser definido por meio de um detalhe arquitetônico. Um modelo parecido com esse é descrito por Broadbent (1973), que apresenta o processo de projeto em espiral, com uma série de pontos de decisão (Figura 6.4b). As soluções evoluem ao longo da espiral, de um nível mais abstrato para um nível mais concreto.

Com a avaliação desses modelos e das análises dos estudos de caso (apresentadas no Capítulo 5), o que se observa é que o processo de projeto é compreendido por uma série de estágios evolutivos, definidos por vários pontos de decisão. *Feedbacks* e *return loops* ocorrem na sequência de decisões. Sendo evolutivo, significa que, em cada novo ciclo, passa-se a um novo estágio evolucionário do projeto. Em alguns momentos, as soluções podem aparentemente dar a ideia de que não evoluíram ou que regrediram, mas o nível de informação e conhecimentos sobre elas são maiores de que nos estágios de decisão iniciais. Logo, indicam um amadurecimento, mesmo que em algumas situações a morfologia seja semelhante a uma solução anterior. O que faz diferenciar um projeto no estágio inicial e num estágio mais evoluído não é o nível de detalhe ou abstração, mas sim a quantidade de restrições. Quanto mais evoluído, maior é o número de restrições impostas à solução. As restrições, que no processo de projeto analógico

(não digital) podem não ser identificadas como um elemento palpável de projeto, no processo de projeto digital, devem ser explícitas e podem estar presentes em regras e parâmetros.

Figura 6.4 Modelos de processo de projeto



Nota: a) mapa de processo de projeto com seqüências de decisão proposta por Markus (1971); b) modo alternativo de representar o processo de projeto proposto por Broadbent (1973)

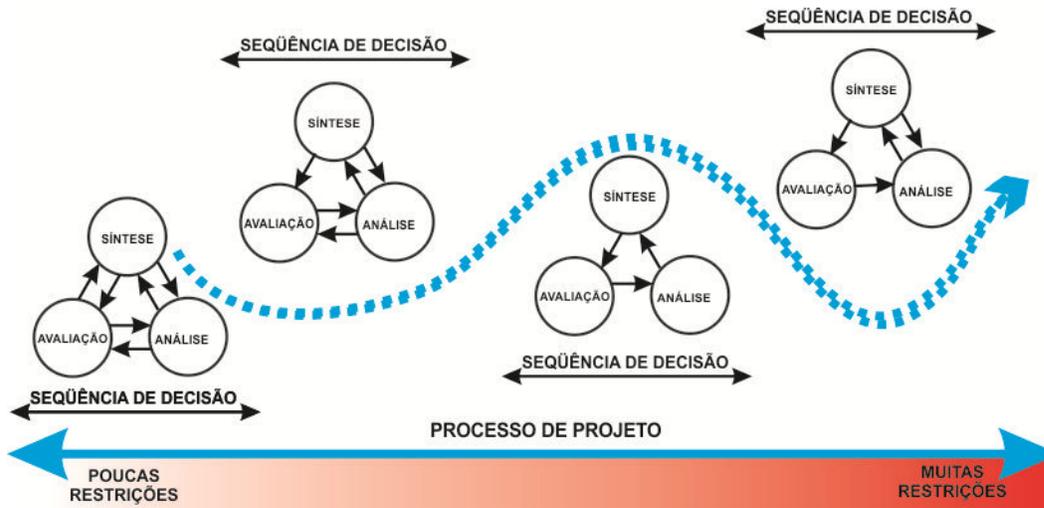
Fonte: a) adaptado de Markus (1971, p. 241); b) adaptado de Broadbent (1973)

Por fim, o que se observou é que o processo de projeto compreende diversos ciclos de decisão que estão interconectados. Esses ciclos são constituídos pelas fases de análise, síntese e avaliação, e podem estar articulados de modo uni ou bidirecional. Em um mesmo processo de projeto, poderão existir diferentes configurações na maneira como essas fases se articulam, de acordo com a seqüência de decisão, podendo ser unidirecional, bidirecional ou parcialmente unidirecional. O crescimento no número de restrições durante o processo de projeto indica que o projeto passa por um processo de evolução, com o aumento no número de informações obtidas, analisadas, avaliadas e processadas.

A Figura 6.5 mostra o modelo de processo de projeto proposto neste trabalho. Constitui-se por: diversas seqüências de decisão; cada seqüência de decisão apresenta um modelo particular de fluxo de informação entre as fases; esse modelo pode ser igual ou diferente ao de outras seqüências; os ciclos passam por um processo de evolução; inicia-se com poucas

restrições e, à medida que o projeto cresce, vai aumentando o número de restrições; a quantidade de informações de projeto é encorpada ao processo de projeto.

Figura 6.5 Modelo alternativo de processo de projeto digital



Fonte: Autoria própria

6.3.2 Sequência de decisões e modelo digital

Para que as fases de uma sequência de decisão estejam conectadas de modo apropriado, é necessário um complexo processo de codificação e decodificação das informações que fluem entre essas fases (KALAY, 2004). A comunicação é o meio que possibilita que o fluxo da informação entre as fases de análise, síntese e avaliação seja inteligível a ponto de permitir que ocorra a sequência de decisão. A comunicação utiliza os meios de representação como modo de decodificação da informação em uma linguagem legível. A representação aparece como o quarto componente da sequência de decisão (Figura 6.6).

Os estudos em metodologia de projeto abordam tradicionalmente projeto como um processo de resolução de problemas, utilizando-se, para isso, métodos, técnicas e ferramentas. A resolução do problema consiste, geralmente, em resolver problemas dados. Inicia-se com um problema dado e, por meio de seleção dos recursos disponíveis e do meio mais adequado aos fins estabelecidos, definem-se as estratégias de resolução de problema. Com a ênfase na

resolução do problema, é ignorado o processo pelo qual se define a decisão a ser tomada, os fins a serem alcançados e os significados das escolhas (Schön, 1983).

Figura 6.6 Mapa de sequencia de decisão composto pela análise, síntese, avaliação e comunicação



Fonte: Autoria própria

Em contraste com essa visão, Schön (1983, 1987, 1992), Schön e Wiggins (1992), mostram que o estudo do projeto deve estar focado principalmente no projetista e no pensamento do projeto. Segundo Schön (1992), o projetista constrói o mundo do projeto dentro do qual ele define o perfil do espaço de soluções e inventa os meios pelos quais ele vai seguir para encontrar a solução de projeto. Na prática, os problemas são construídos mediante situações problemáticas, que sejam intrigantes, inquietantes e incertas. Essa definição de problema constitui-se num processo interativo, em que os projetistas definem o que será tratado e qual o contexto em que se insere (SCHÖN, 1983).

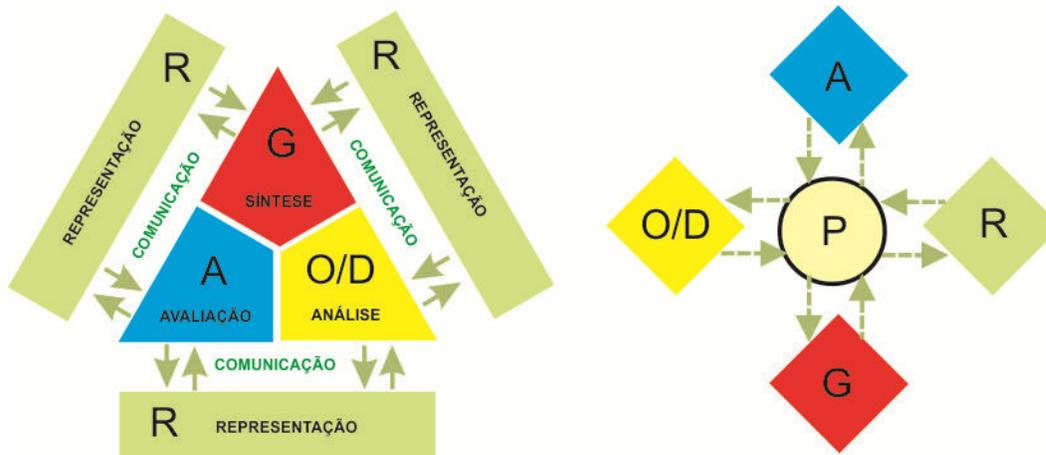
Essa abordagem centraliza o foco das pesquisas em metodologia de projeto no estudo do projetista e no pensamento de projeto. Essas pesquisas abordam a interação do projetista com a representação do problema e caracterizam o projeto como um processo de recepção, reflexão (interpretação) e reação (transformação). Schön e Wiggins (1992) mostram que o projeto é composto por sequências de ação, como observar um desenho, transformá-lo, observar o resultado, descobrir certas consequências não intencionais da transformação. Arquitetos têm de fato uma intenção em transformar uma forma, mas eles não preveem todas as possíveis consequências de suas ações. Sua intenção é susceptível de evoluir na sua relação com o meio visual.

Essa terminologia conceitual de projeto como interação com o meio visual proposta por Schön tem um significado muito mais importante no meio digital. No pensamento de Oxman (2006), o papel central do homem interagindo no processo de geração da forma pode ser mantido nos diferentes modelos de projeto digital. Além disso, ele afirma que esse conceito tem profundas implicações para o projeto digital uma vez que o controle do processo digital, complexo como deve ser, baseia-se na interação e reflexão com o projetista.

O que tem tornado o complexo e integrado sistema de projeto digital com características únicas é a maneira como ocorre o controle individual do projetista sobre os componentes do projeto digital. Na era digital, esse controle é influenciado pelo aumento das possibilidades de interfaces de projeto e da especialização da atividade de projeto, exigindo dos projetistas habilidades avançadas em programação aplicada a projeto (OXMAN, 2006).

Nesse contexto, propõe-se que a representação simbólica de seqüência de decisão convencional (Figura 6.7a) seja suplantada por uma representação proposta por Oxman (2006) – Figura 6.7b. Nessa nova representação, os componentes do processo de projeto aparecem interagindo diretamente com o projetista, que se transforma no elemento central do modelo de projeto. Nesse modelo o projetista aparece com a posição simbólica central (P). As fases da seqüência de decisão – geração (G), avaliação (A) e representação (R) – constituem-se no modelo de projeto digital nos componentes geração, avaliação e representação do projeto digital.

Figura 6.7 O mapa de seqüência de decisão(a) serviu como base para formular uma representação simbólica de modelo de projeto digital (b)



a)

b)

Fonte: Autoria própria

A fase de análise compreende a investigação dos problemas de projeto. Por meio dessa investigação, definem-se requisitos e parâmetros que a síntese arquitetônica deve atender. Esses requisitos e parâmetros de projeto representam os principais desempenhos que a solução deve almejar. Durante o processo de projeto, o meio utilizado para melhorar o desempenho das soluções, em termos de atendimento aos requisitos e parâmetros, é pela otimização da solução. A otimização do desempenho da solução aparece como resposta ao problema de projeto, identificado na análise e transcrito nos requisitos e parâmetros. A análise do problema de projeto fornece, portanto, as diretrizes expressas nos critérios de desempenho para a otimização. Por existir esse vínculo, a fase de análise do mapa de sequência de decisões é substituída, no modelo proposto por Oxman (2006), pelo componente desempenho, que aparece com a função de otimização do desempenho (O/D).

6.3.3 Modelos de projeto digital

O modelo simbólico proposto por Oxman (2006) compõe-se por uma estrutura definida pelo projetista (P), posição central; pelos quatro componentes do projeto digital (G, R, A, O/D) e pela comunicação (C). A comunicação se dá por meio de propriedades e das relações. As propriedades podem ser implícitas ou explícitas. As relações podem ser por meio de interações e ligações.

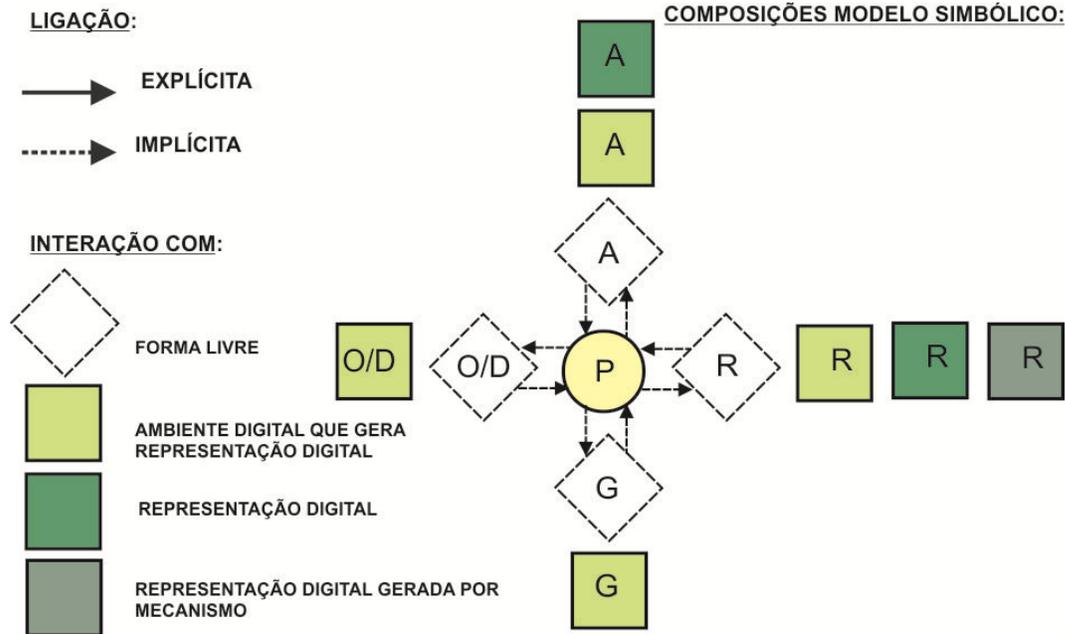
As propriedades implícitas baseiam-se num conhecimento implícito, que é característico dos projetos não digitais. As propriedades explícitas têm base na natureza dos processos computacionais que utiliza a capacidade do projetista em formular, representar, implementar e interagir representações do conhecimento de modo explícito e muito bem formulado (OXMAN, 2006).

As ligações são o produto do fluxo da informação. Podem ser explícitas, quando carregam propriedades explícitas; ou implícitas quando carregam propriedades implícitas. As interações podem ser externas e internas. Nas externas, o projetista interage diretamente com a forma. Nas internas, os projetistas interagem com uma forma digital por meio de certos ambientes digitais, processos computacionais ou mecanismos. Oxman (2006) propõe quatro classes de interação: interação com uma forma livre; interação com uma representação digital;

interação com uma representação digital gerada por um mecanismo; interação com um ambiente digital que gera uma representação digital (essas classes estão detalhadas no Capítulo 2).

A Figura 6.8 apresenta o modelo simbólico proposto por Oxman (2006) com as admissíveis maneiras de mapear as possibilidades genéricas de projeto digital por meio das relações entre o projetista, os componentes, os tipos de interação e ligação. Por meio dos tipos de articulação entre projetistas, componentes e comunicação, é possível identificar as cinco classes paradigmáticas de modelos de projeto digital propostos por Oxman (2006).

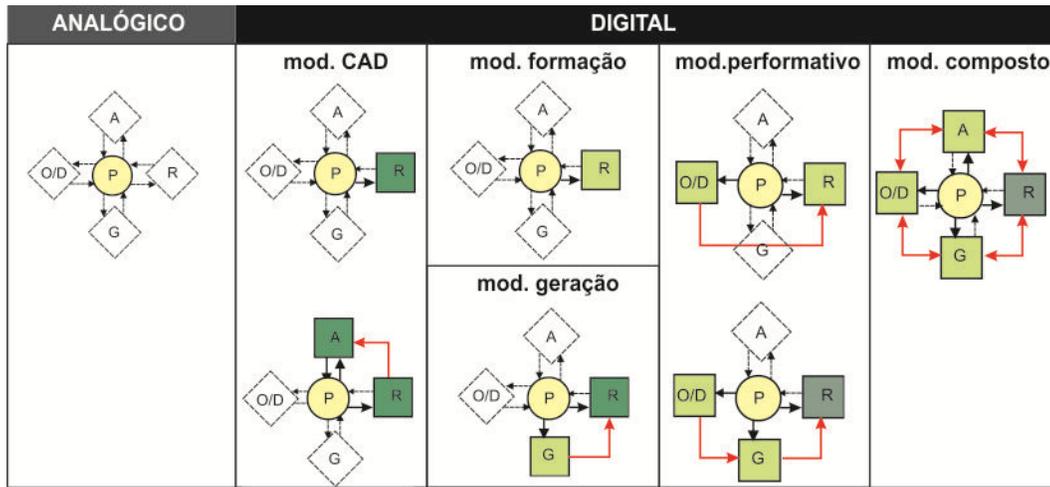
Figura 6.8 Estrutura do modelo simbólico com indicação dos tipos de ligação, classes de interação e possíveis maneiras de organizar os tipos de interação nos modelos simbólicos



Fonte: Adaptado de Oxman (2006)

Com base nas cinco classes paradigmáticas de modelos de projeto digital, Oxman (2006) apresenta sete diferentes maneiras de representar os múltiplos processos de projetos digitais. A Figura 6.9 apresenta o modelo analógico e os sete modelos de projetos digitais.

Figura 6.9 Classes e subclasses de modelos de projeto digital propostos por Oxman (2006)



Fonte: Autoria própria

6.3.4 Modelos de projeto digital performativo

Após os estudos de caso em métodos de projeto digital baseados nos Modelos Performativos, apresentados no Capítulo 5, constatou-se que na prática os processos de geração da forma que utilizam esse modelo envolvem o uso de diversos modelos simbólicos, simultaneamente no desenrolar de um único projeto. Ou seja, as múltiplas sequências de decisões que ocorrem durante o processo de projeto caracterizam-se por diversos modelos simbólicos, e não apenas um, como proposto por Oxman (2006, 2007).

Essa constatação indica que o processo de projeto apresenta um alto grau de complexidade, que se reflete nos variados níveis de controle pelos projetistas dos componentes do projeto digital. O que implica afirmar que, no processo de projeto, o projetista assume variadas posturas na sua relação com a representação, avaliação, otimização e geração da forma.

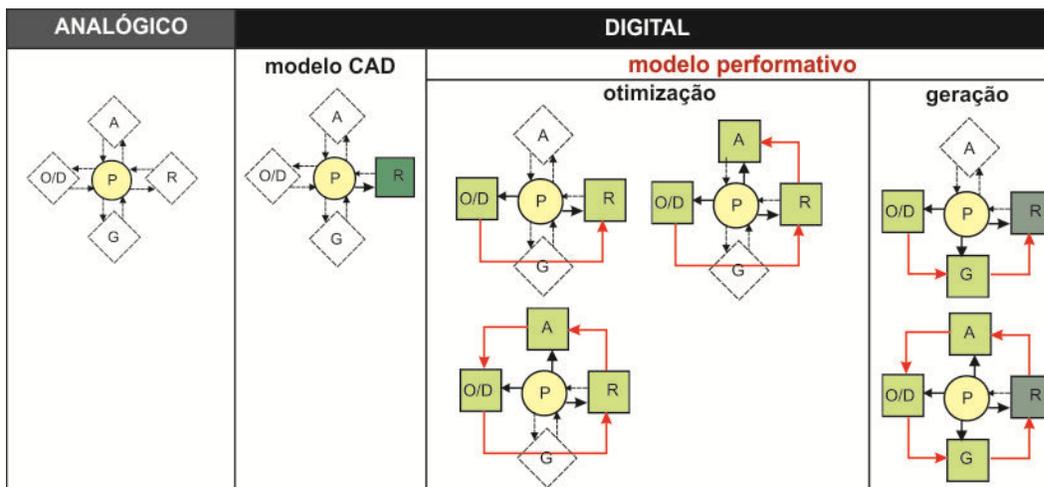
A complexidade é também reflexo de uma prática de projeto que, desde os momentos iniciais do processo de geração da forma, calca-se em uma profunda colaboração entre arquitetos e engenheiros. Essa colaboração vai refletir-se num processo de geração da forma em que a atuação de diferentes profissionais vai suceder com intensidades variadas nos múltiplos estágios do processo de decisão. Esses profissionais, por terem diferentes níveis de

conhecimento e de visão do problema, vão interagir de variadas maneiras com o meio digital e os componentes do projeto.

Além disso, o emprego de técnicas computacionais baseadas em algoritmos, usadas nesses estudos de caso, provou ser uma interface bem-sucedida para uma prática colaborativa entre projeto arquitetônico e estrutural (TESSMANN, 2008). Prática essa que incorporou, durante o processo de projeto, procedimentos que oscilaram entre racionalização e exploração formal.

A Figura 6.10 mostra os sete modelos simbólicos identificados nos estudos de caso realizados nesta pesquisa. Os modelos Analógicos e Modelo CAD estão presentes em todos os estudos de caso. A presença desses modelos comprova-se pelo fato de que em alguns estágios do processo de projeto baseados nos modelos performativos utilizam-se técnicas, tradicionalmente conhecidas pelos arquitetos, de representação de uma ideia anteriormente concebida na mente do arquiteto. Algumas dessas técnicas associam-se a práticas não digitais ou apenas de representação digital. Entre essas técnicas, podem-se destacar o uso de esboços, croquis, a confecção de maquetes, entre outras.

Figura 6.10 Modelos simbólicos identificados nos estudos de caso



Fonte: Autoria própria

Os modelos simbólicos que se identificam com os Modelos Performativos Baseados na Otimização apresentam variações no tipo de ligação e interação dos projetistas e os componentes do projeto digital. Um dos modelos identificados nos estudos de casos é similar ao proposto por Oxman (2006); os outros dois apresentam como diferencial a incorporação de um ambiente

digital para a avaliação. Em um deles, a avaliação tem uma ligação direta com a otimização/desempenho; no outro, é intermediada pelo projetista, que, diante dos resultados da avaliação, altera manualmente o ambiente digital em que vai realizar a otimização.

Para os modelos simbólicos que se identificam com os Modelos Performativos Baseados na Geração, observou-se que, nos estudos de caso, identificou-se apenas uma variação ao modelo proposto por Oxman (2006). Essa variação ocorre quando a avaliação torna-se uma atividade explícita durante uma sequência de decisões. Nesse caso, todos os componentes do projeto se interconectam, de modo explícito e sistematizado, formando uma sequência linear, unidirecional, que ocorre de maneira automatizada durante todo um ciclo de sequência de decisão.

Pelos modelos simbólicos identificados nos estudos de caso, conclui-se: o que permite classificar o método dentro da classe paradigmática de projeto digital performativo é a presença de um ou mais modelos classificados como modelo performativo, durante o processo de geração da forma. Esses modelos estão presentes em apenas algumas sequências de decisão, durante o processo de projeto. Essas sequências são consideradas entre as mais importantes do processo de projeto. Elas fazem parte da essência do método e vão orientar o pensamento dos projetistas.

Os outros modelos simbólicos que coparticipam do processo de projeto performativo assumem um papel de estabelecerem relações cognitivas importantes, que não estão presentes nos ciclos de decisão caracterizados pelos principais modelos simbólicos do projeto performativo (modelos de otimização e geração). Estas relações cognitivas não aparecem, pois nos ciclos com modelos performativos, o perfil da interação dos projetistas com os componentes do projeto digital não contemplam relações importantes, por exemplo, a relação ambígua que ocorre durante a realização de um croqui. Essa coparticipação, portanto, garante acrescentar todas as vantagens das sequências de decisão automatizadas ou semiautomatizadas às ações cognitivas presentes nos processos manuais de concepção da forma.

6.4 Estrutura Conceitual dos Modelos Performativos

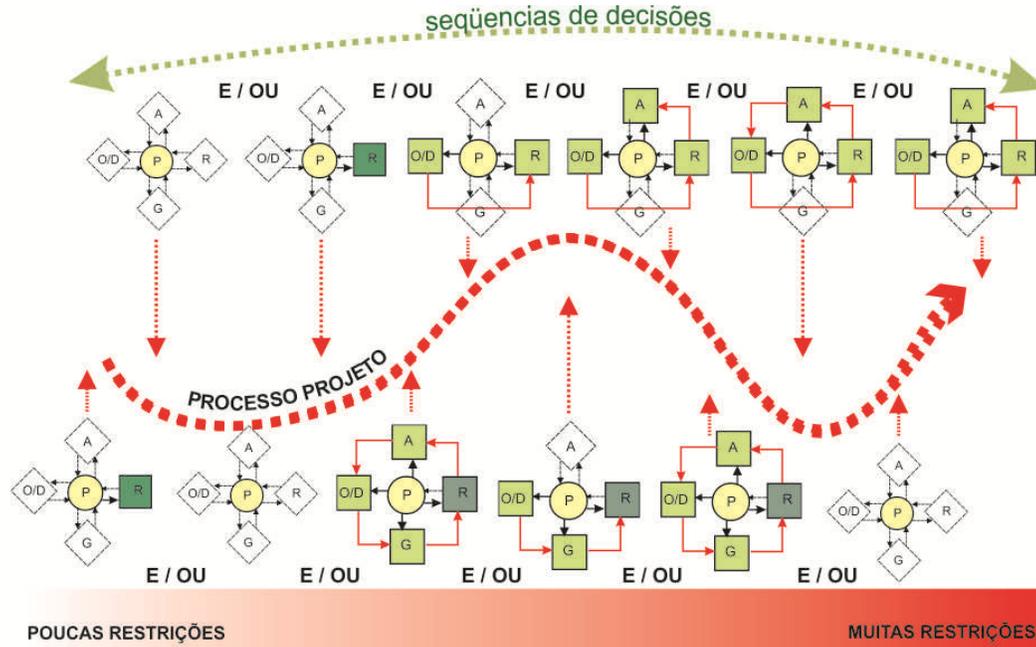
6.4.1 Múltiplas representações simbólicas do modelo performativo

Na Figura 6.5, apresentou-se um modelo de processo de projeto composto por diversas sequências de decisão. As sequências de decisão podem apresentar diferentes tipos de fluxo de informação entre suas fases. Podem ser uni ou bidirecionais entre cada duas fases. Inicia-se com poucas restrições, durante o processo de projeto, incrementam-se o número de restrições. Na Figura 6.7, demonstrou-se que o modelo tradicional de sequência de decisão pode ser suplantado por um modelo em que o projetista transforma-se no elemento principal do processo de projeto. Na Figura 6.10, o modelo de projeto performativo apresentou-se como caracterizado por diversos modelos simbólicos, que representam as diversas sequências de decisão do processo de projeto.

As abordagens apresentadas acima fornecem um meio rigoroso para estabelecer uma estrutura de mapeamento do processo de projeto digital performativo. Essa estrutura constitui-se de várias sequências de decisão ao longo de uma curva evolutiva que vai de um estágio com poucas restrições, e, à proporção que o projeto se desenvolve, incrementam-se o número de restrições.

A Figura 6.11 mostra o mapeamento do processo de projeto de um modelo performativo. Nessa figura é possível identificar: uma espiral em vermelho que mostra o processo de projeto como algo evolutivo; o processo de projeto inicia-se com poucas restrições e, no seu desenvolvimento, ocorre um aumento incremental no número de restrições (barra vermelha na parte inferior da figura); o processo de projeto compõe-se pela soma de diferentes sequências de decisão constituídas por diversos modelos simbólicos de projeto digital (de acordo com o método, diferentes modelos simbólicos vão sendo agregados ao processo de projeto); esses modelos podem repetir-se e sucederem em diferentes estágios do processo de projeto; os primeiros estágios caracterizam-se, geralmente, por se constituírem de modelos simbólicos analógicos, ou com uso de um meio digital apenas como instrumento representacional (Modelo CAD).

Figura 6.11 Modelo performativo de processo de projeto digital



Fonte: Autoria própria

6.4.2 Fluxo da informação

A comunicação é o meio que possibilita que o fluxo de informações seja inteligível a ponto de viabilizar que ocorram as seqüências de decisões. O fluxo de informações é um componente essencial da seqüência de decisões e necessário para a existência do processo de projeto. O que se observou, nos estudos de caso apresentados no capítulo anterior, é que o fluxo de informações, no modelo performativo de projeto digital, pode ocorrer de uma maneira analógica ou digital (Figura 6.12). Esse fluxo ocorre acontece entre os projetistas, entre os projetistas e os componentes do projeto digital (geração, representação, avaliação e otimização/desempenho) e entre os componentes do projeto digital. Nesse último caso, o fluxo de informações só surge quando é automatizado.

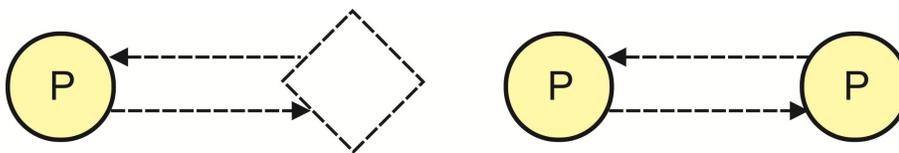
Figura 6.12 Fluxos de informação de projeto: analógico (em azul) e digital (em vermelho)



Fonte: Autoria própria

O fluxo de informações entre o projetista e os componentes do projeto ocorre de modo analógico (Figura 6.13a) quando a interação do projetista com o componente se dá de maneira não digital, implícita. Esse tipo de interação é muito comum nos estágios iniciais do processo de projeto dos modelos performativos. No processo de geração da forma, sequências de decisão mais automatizadas passam a aparecer de maneira sistemática. O fluxo de informações entre os projetistas também é muito comum ser de maneira analógica (Figura 6.13b); surge desde os momentos iniciais do processo de projeto, quando se realizam as primeiras discussões sobre o programa de necessidades, os conceitos e as estratégias de projeto.

Figura 6.13 Fluxo de informação analógica: a) entre projetistas e componentes do projeto digital; b) entre projetistas.



a)

b)

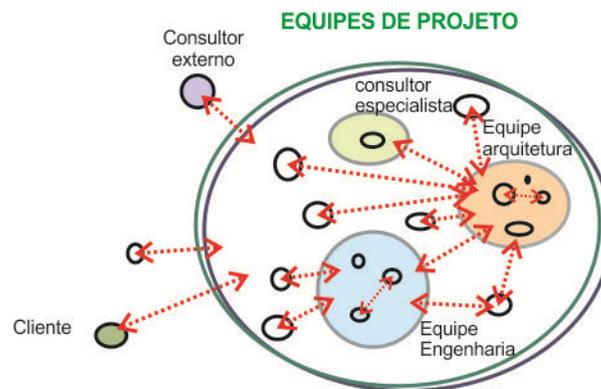
Nota: a) entre projetistas e componentes do projeto digital; b) entre projetistas

Fonte: Autoria própria

O fluxo de informações digitais é bem mais complexo. Entre os projetistas (Figura 6.14), ocorre por meio do intercâmbio de arquivos e informações digitais. Esse intercâmbio pode ocorrer com projetistas de um mesmo escritório (equipes de um escritório de arquitetura, por exemplo), com projetistas de escritórios diferentes (arquitetos e engenheiros estruturais, por exemplo) e com projetistas e consultores (como entre arquiteto e especialista em acústica). Na

prática, observa-se que a qualidade da troca de informações nem sempre é íntegra, muitas vezes surgem ruídos, com perda de informações. Entre as estratégias observadas para um bom intercâmbio de informações entre projetistas, e assim uma boa interoperabilidade entre aplicativos usados no projeto, é a adoção de uma mesma plataforma de software ou uso de padrão de protocolo de troca de dados entre os aplicativos computacionais. No entanto, isso nem sempre é possível. O uso do *Industry Foundation Classes* (IFC) como principal protocolo público de troca de dados nos estudos de caso, por exemplo, deu-se de modo bastante restrito. Eram usados mais sistematicamente apenas nos estágios mais avançados do processo de projeto, estágios de desenvolvimento e detalhamento. Na etapa inicial do processo de projeto, quando os projetos ainda não eram "tipados", os protocolos de troca de dados eram geralmente aqueles usados pelas principais ferramentas digitais.

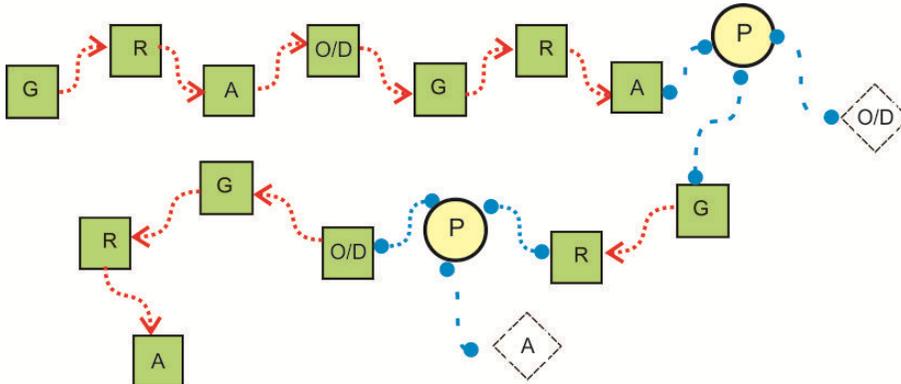
Figura 6.14 Fluxo da informação digital entre equipes de projeto



Fonte: Autoria própria

O fluxo direto de informações entre os componentes do projeto digital ocorre apenas em sistemas com certo grau de automatização. Em algumas situações, o fluxo entre dois componentes é de maneira completamente digital (automatizada); em outras situações, é necessário que o usuário intervenha transferindo um dado manualmente ou pressionando um botão para a continuidade do processo. Em muitos casos, o fluxo de informações se dá com estágios automatizados, intercalados por estágios manuais. Nos estágios automatizados, o fluxo de informações entre dois componentes é de maneira automática. Nos estágios manuais, o projetista intervém decifrando um resultado do estágio anterior e interagindo de modo implícito com o componente. A Figura 6.15 mostra os fluxos analógicos (linha tracejada em azul) e digitais (seta tracejada em vermelho) entre os componentes do projeto digital.

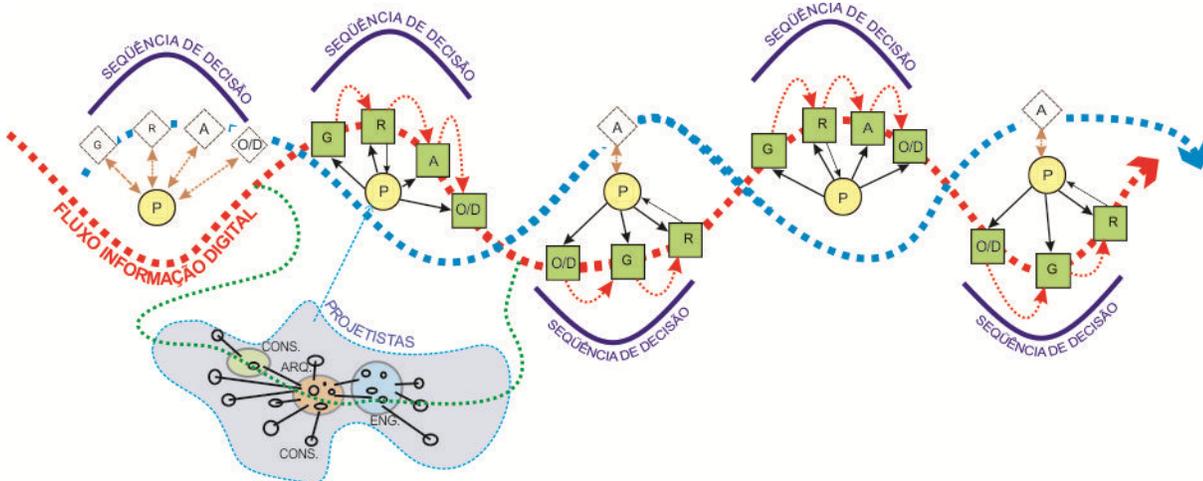
Figura 6.15 Fluxo da informação digital entre componentes do projeto digital



Fonte: Autoria própria

A Figura 6.16 sintetiza a estrutura de mapeamento do fluxo de informações do modelo de projeto digital performativo. Essa figura constitui-se por duas helicóides que giram entre si e representam o fluxo de informações no processo de projeto. A helicóide em azul representa o fluxo analógico de informações. Nesse caso, a transmissão da informação entre componentes do projeto digital é intermediada pelo projetista que ingere a informação e por meio de processos cognitivos implícitos transforma a informação em conhecimento transferindo para o componente seguinte. O fluxo de informações se dá única e exclusivamente intermediada pelo projetista (linha tracejada marrom).

Figura 6.16 Mapeamento do fluxo de informações no modelo de Projeto Performativo



Fonte: Autoria própria

A helicóide vermelha caracteriza-se pela informação digital. Nela é possível identificar três classes de fluxos de informações durante as sequências de decisão do processo de projeto: o

fluxo da informação entre os projetistas (linha tracejada verde); o fluxo de informação entre os componentes (linha tracejada vermelha fina); o fluxo de informação digital entre o projetista e os componentes do projeto (linhas pretas).

Observa nessa estrutura que o projetista aparece em todas as sequências de decisão numa posição central. O que vai variar de uma sequência para outra é a natureza da interatividade e o tipo de controle da informação pelos projetistas. Nas sequências completamente analógicas, o fluxo da informação entre o projetista e o componente se dará de modo implícito, não digital. As sequências com fluxo de informação digital poderão ser constituídas por sistemas semiautomatizados e automatizados. Nos sistemas semiautomatizados, um, dois ou três componentes do projeto digital se constitui por uma interação digital com uma representação digital; uma representação digital gerada por um mecanismo; ou uma interação com um ambiente digital que gera uma representação digital. Nos sistemas automatizados, o projetista só interage com um ambiente digital. Nesses casos, pode ocorrer um fluxo direto de informações entre os componentes do projeto digital, sem intermediação do projetista.

O fluxo de informação no modelo de projeto performativo caracteriza-se por ser ora analógico, ora digital. Segundo Sacks (informação verbal)²⁴, a condição para a existência do fluxo de informações digitais é o BIM. Esse enquanto ação, se relaciona com uma forma de trabalho que gerencia o fluxo de informações do processo de projeto, portanto, acrescenta Sacks, é condição para avaliação, otimização e geração do processo de projeto digital.

De acordo com Succar (2009), o BIM trata essencialmente do gerenciamento do fluxo da informação digital na AECO mediante um conjunto inter-relacionado de processos, tecnologias e políticas. É uma condição fundamental para o fluxo de informação digital no modelo performativo, portanto, para a própria existência do modelo performativo.

²⁴ Entrevista concedida por Rafael Sacks, Professor Associado da Technion, Israel Institute of Technology, em Haifa, 28 de março de 2011.

6.4.3 Representação da estrutural conceitual

Os estudos de caso em modelos performativos mostraram que o processo de geração da forma caracteriza-se pelo uso simultâneo de diversas técnicas: manuais e digitais. Entre as técnicas manuais, incluem-se os esboços, croquis, maquetes físicas. Entre as técnicas digitais identificadas, estão a modelagem paramétrica, as Análises de Elemento Finito (FEA), os Algoritmos Genéticos (GA), entre outros. O processo de geração da forma, nesse tipo de projeto, é uma atividade essencialmente colaborativa entre arquitetos e engenheiros estruturais, cada um dos quais contribuindo mais ou menos no uso de uma técnica ou outra.

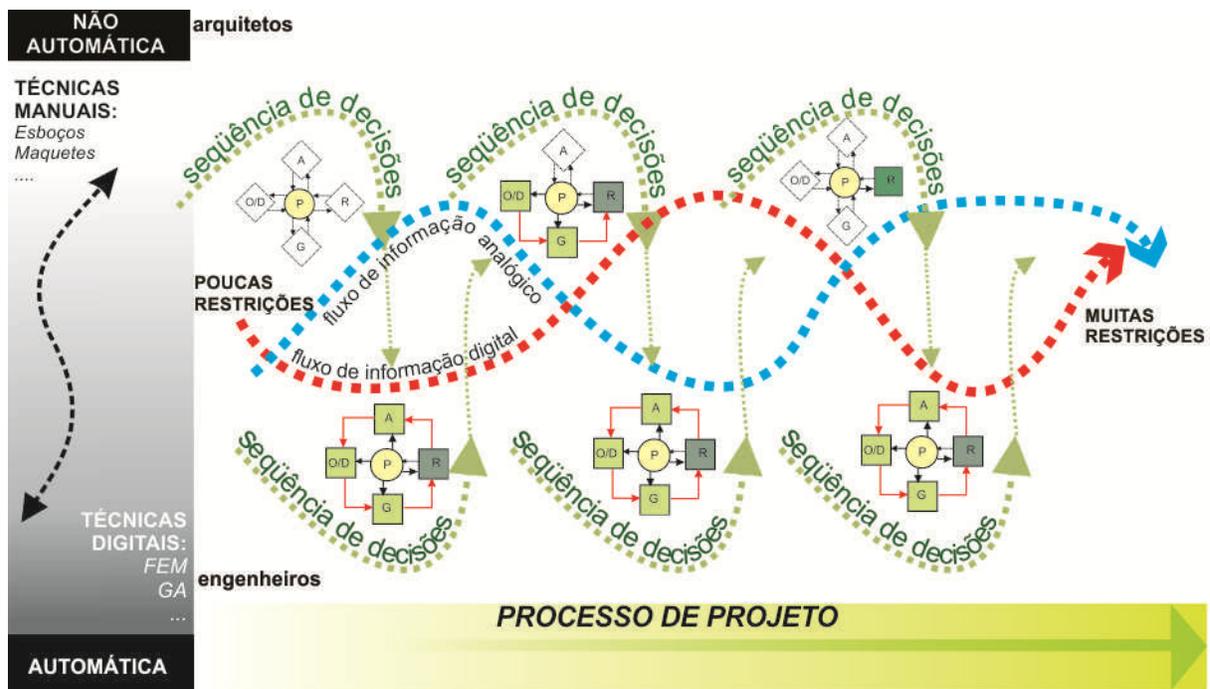
Embora não seja regra, em geral, observou-se que a participação dos arquitetos associava-se mais ao manuseio de técnicas manuais e os engenheiros, a técnicas mais automatizadas. Esse vínculo está em função da natureza do problema visto pelo arquiteto e pelo engenheiro e do perfil do pensamento. Enquanto os arquitetos usam um pensamento mais subjetivo, com um julgamento pessoal, com base numa subjetividade e num conhecimento empírico, os engenheiros baseiam seus pensamentos em conhecimentos formais, com uma prática de projeto baseada apenas "naquilo que pode ser calculado" (TESSMANN, 2008, p. 37).

Diante das considerações apresentadas acima, do mapeamento do processo de projeto baseado num modelo performativo, apresentado na Figura 6.11, e do mapeamento do fluxo de informações, resumido na Figura 6.16, foi possível se chegar a uma estrutura conceitual de processo de projeto digital performativo, representada pela Figura 6.17. Essa estrutura caracteriza-se por:

- ser essencialmente colaborativa entre arquitetos e engenheiros estruturais, durante a síntese arquitetônica;
- usar simultaneamente técnicas de projeto manuais e técnicas automatizadas;
- ter as técnicas manuais, muitas vezes, associadas à ação do arquiteto, e as técnicas automáticas associadas à atuação do engenheiro;
- ser um processo evolutivo (inicia-se o processo com poucas restrições e progressivamente aumenta-se a quantidade de restrições);
- coexistência de múltiplos estágios de decisão durante o processo de projeto;

- iniciar o processo de projeto com poucas restrições e progressivamente aumentar a quantidade de restrições;
- constituir-se de fluxo de informação analógico e digital;
- iniciar-se por ciclos de decisões manuais e, no decorrer do processo de projeto passam a ser caracterizados por ciclos semiautomatizados ou automatizados;
- basear-se no *Building Information Modeling*;
- usar um processo de projeto topológico, substituindo uma tradição tipológica.

Figura 6.17 Modelo conceitual de processo de projeto digital performativo



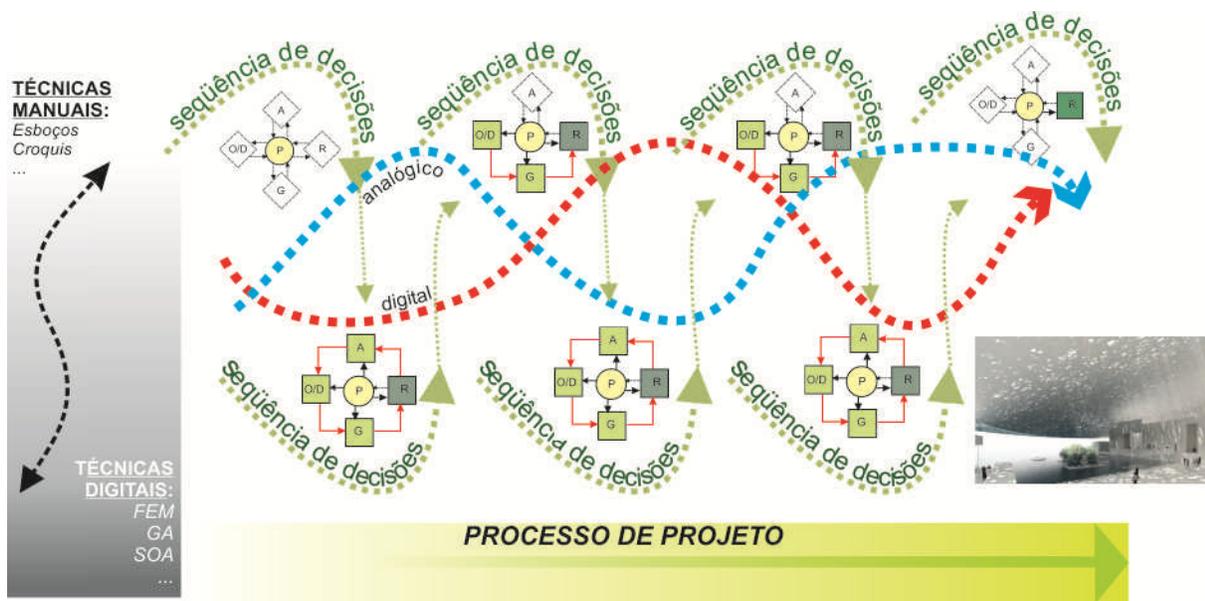
Fonte: Autoria própria

A estrutura conceitual proposta demonstra ser um meio rigoroso para compreender os métodos baseados nos modelos de projeto digital performativos, de acordo com o tipo de relação entre os projetistas e os componentes do projeto digital, durante as diversas sequências de decisão. Essa estrutura conceitual permite demonstrar que o projeto digital performativo suporta diversos modelos simbólicos, sejam eles mais analógicos, sejam mais digitais, durante as sequências de decisão.

6.4.4 Estrutura conceitual nos estudos de casos

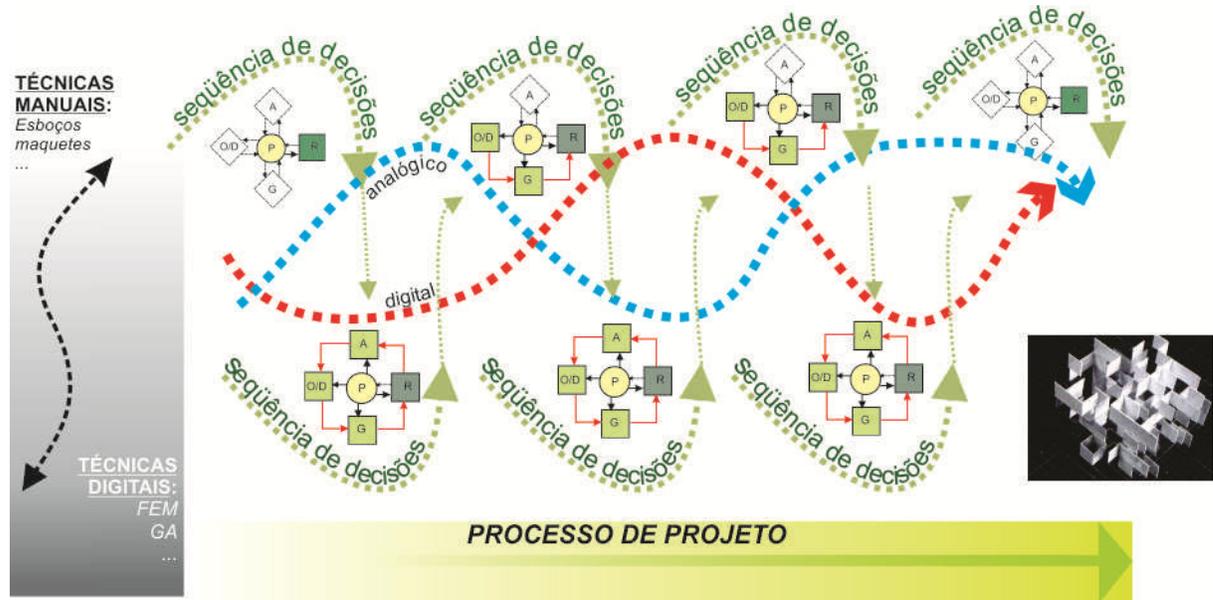
Por meio da Estrutura Conceitual proposta no item anterior, buscou-se estabelecer um mapeamento dos processos de geração da forma dos estudos de caso. Esse mapeamento serviu como meio simbólico para a representação dos processos de projeto estudados nos estudos de caso. Com base no modelo conceitual, apresenta-se, da Figura 6.18 até a Figura 6.23, o mapeamento dos processos de geração da forma dos seis estudos de caso. Em cada um deles, indicam-se algumas das técnicas manuais e digitais, os modelos simbólicos utilizados, que representam o tipo de interação dos projetistas e os componentes do projeto digital, e a ocorrência cronológica de algumas das principais sequências de decisão.

Figura 6.18 Modelo conceitual do processo de geração da forma da cobertura do Louvre Abu Dhabi



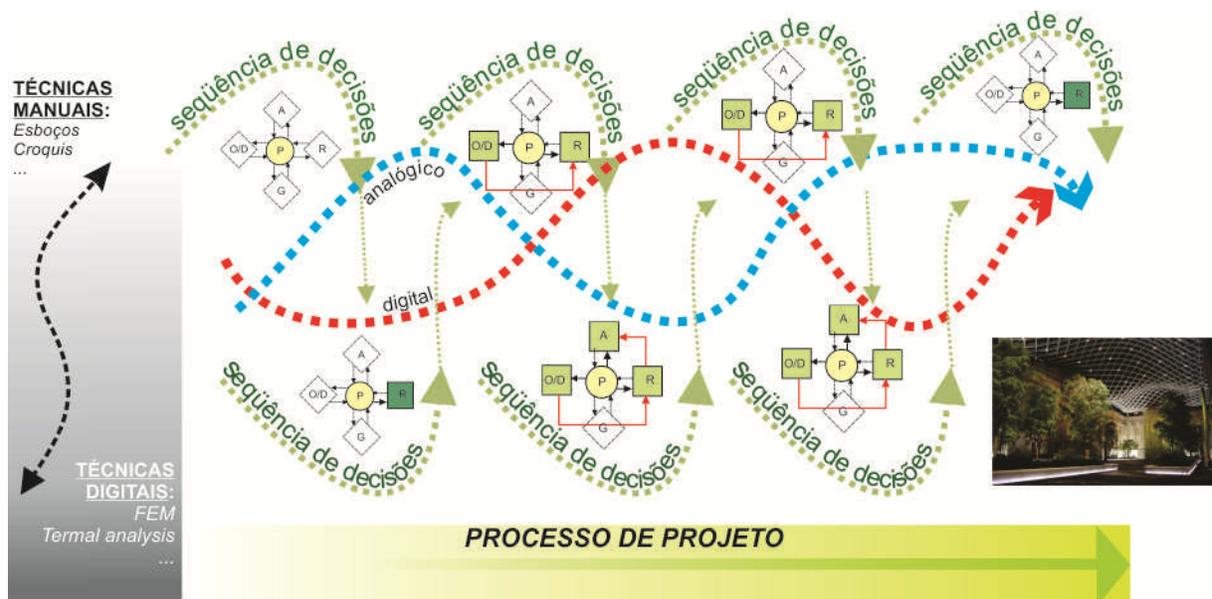
Fonte: Autoria própria

Figura 6.19 Modelo conceitual do processo de geração da forma da Extensão da Hochschule für Technik



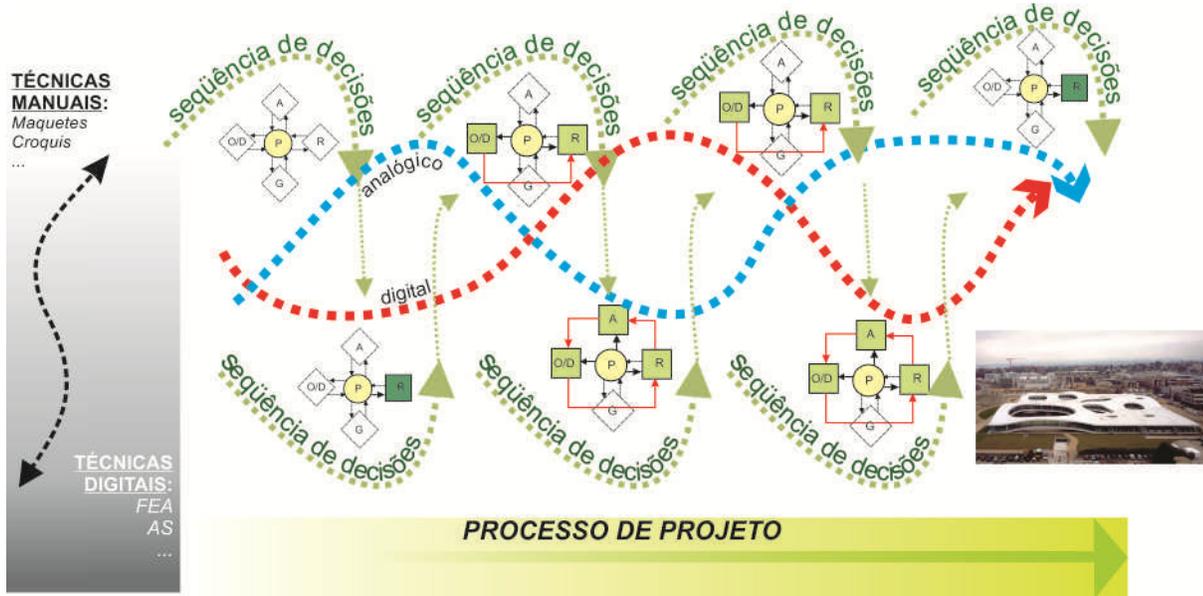
Fonte: Aatoria própria

Figura 6.20 Modelo conceitual do processo de geração da cobertura do Smithsonian Courtyard Enclosure



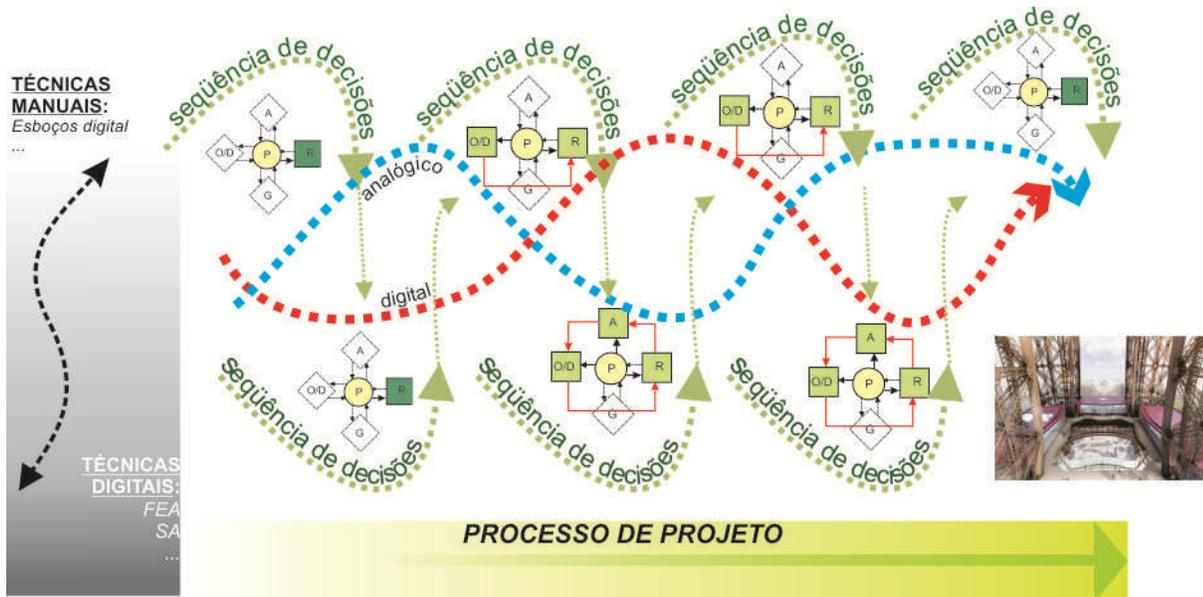
Fonte: Aatoria própria

Figura 6.21 Modelo conceitual do processo de geração da forma do Rolex Learning Centre (EPFL)



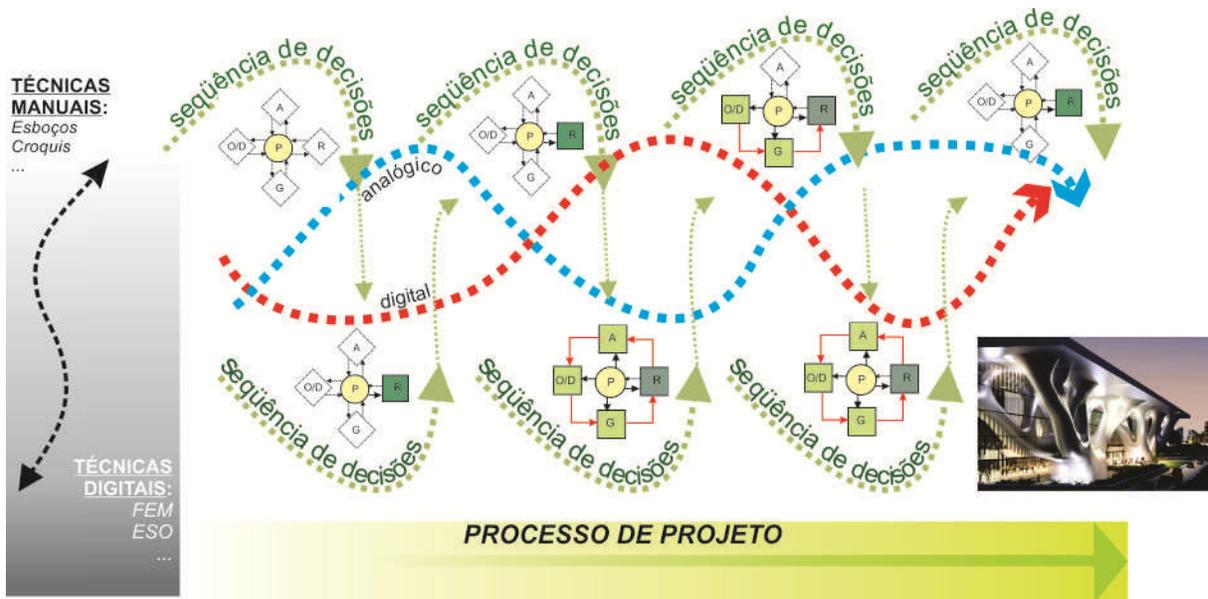
Fonte: Autoria própria

Figura 6.22 Modelo conceitual do processo de geração da forma do Primeiro Piso da Torre Eiffel



Fonte: Autoria própria

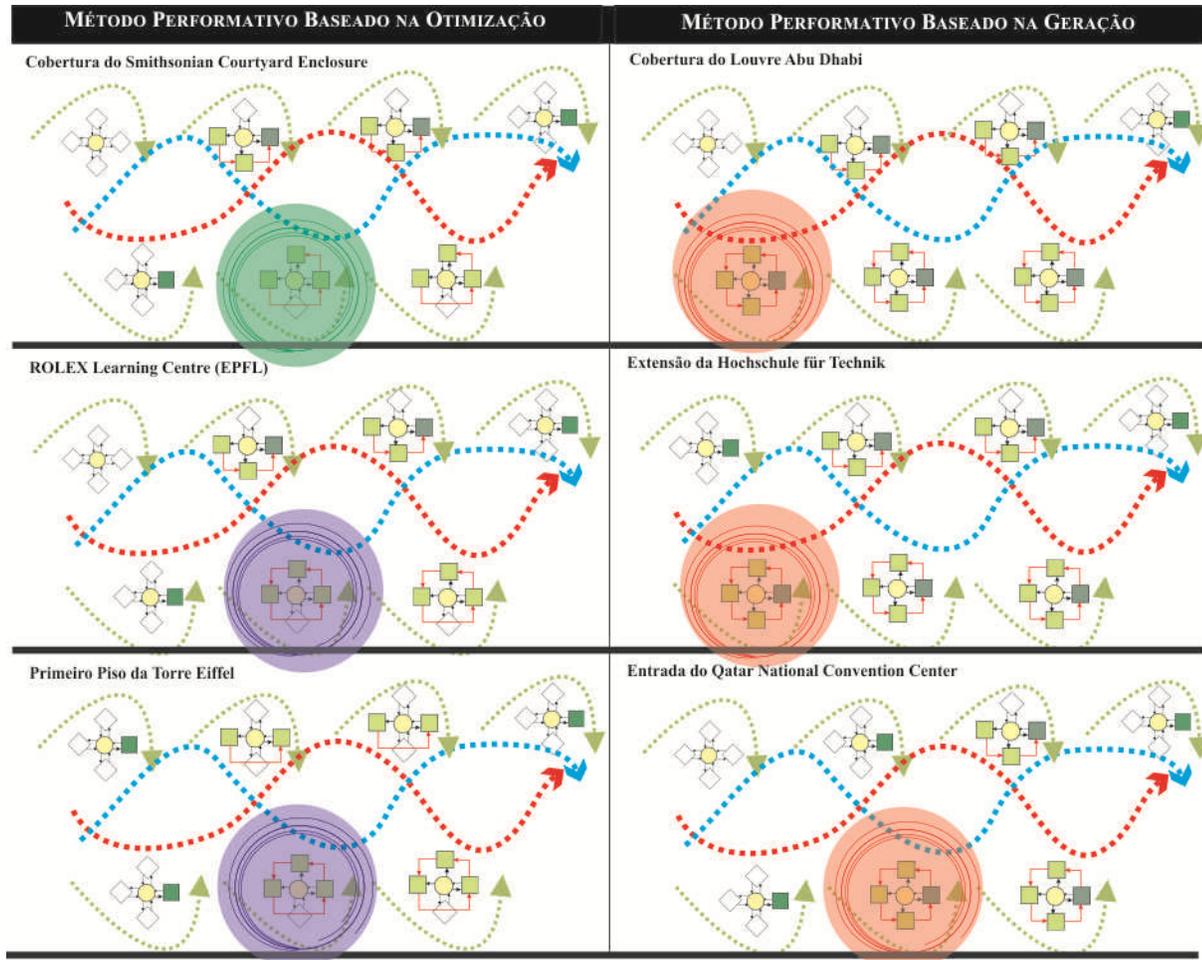
Figura 6.23 Modelo conceitual do processo de geração da forma da Sidra Trees do Qatar National Convention Center



Fonte: Autoria própria

Na Figura 6.24, mostra-se uma síntese dos modelos conceituais mapeados no processo de geração da forma dos seis estudos de caso. Nessa figura classificam-se os modelos conceituais de acordo com a subclasse de modelo performativo. É importante destacar que, embora sejam identificados vários modelos simbólicos de interação de projetistas e componentes digitais em cada um dos processos de projeto, as subclasses se caracterizam por dois principais tipos de modelos simbólicos indicados em vermelho e em azul. O modelo destacado em verde (Projeto da Cobertura do Smithsonian Courtyard Enclosure) é uma variação do modelo em azul.

Figura 6.24 Síntese do mapeamento dos modelos conceituais de processo de geração da forma dos seis estudos de casos. Em cada caso é destacado o modelo simbólico que caracteriza o modelo de projeto digital



Nota: Em cada caso, destaca-se o modelo simbólico que caracteriza o modelo de projeto digital

Fonte: Autoria própria

6.5 Considerações sobre a Estrutura Conceitual

A proposição de uma Estrutura Conceitual de processo de projeto digital performativo visou apresentar uma interpretação desse modelo digital por uma visão de projeto como uma atividade colaborativa, interdisciplinar, complexa, multiprocessual, que abarca diferentes habilidades, níveis de conhecimento e tecnologias. Por meio de uma revisão conceitual nos

modelos paradigmáticos apresentados por Oxman (2006, 2007, 2008a, 2008b, 2009a, 2009b), embasada na observação da prática de projeto, foi possível estabelecer um novo paradigma de processo de projeto baseado no desempenho. Esse paradigma se apoia na revisão dos métodos digitais, no conhecimento das tecnologias e ferramentas computacionais, que têm permitido esse progresso, e na prática de projeto essencialmente colaborativo, baseada no uso de algoritmos computacionais.

Visando elucidar mais esse contexto, algumas formulações foram estabelecidas por meio desse modelo conceitual:

- Prática de projeto essencialmente colaborativa - o desenvolvimento de práticas colaborativas de projeto entre arquitetos e engenheiros estruturais baseado no uso de algoritmos tem-se tornado um método produtivo da incorporação de conhecimentos racionais presentes no projeto estrutural com um pensamento intuitivo de exploração da forma arquitetônica (TESSMANN, 2008).
- Reformulação do papel dos projetistas - associado à mudança progressiva no processo de projeto e de geração da forma, que passa a ter um enfoque essencialmente colaborativo, muda-se também o papel dos projetistas, que cada vez mais estão influenciados por uma prática digital. Essa prática tem incorporado novos conhecimentos relacionados com o pensamento do projeto digital, o uso de novas técnicas e linguagem em script. Para isso, tem exigido novas habilidades no uso e manuseio de ferramentas computacionais, manipulação e manutenção de modelos de informação do edifício. Se, por um lado, tem exigido dos profissionais de projeto novos conhecimentos relacionados com a área computacional, por outro, tem criado uma geração de profissionais de projeto, especialistas em projeto digital. Denominados por Oxman (2006) de literatos digitais (*digital literati*), estes são projetistas com conhecimentos avançados em sistemas digitais. Essa nova classe de profissionais é, para De Kestelier (informação verbal), mais que profissionais com habilidades profundas em linguagem de programação; são arquitetos e engenheiros com conhecimentos profundos na área em vez de simples programadores.
- Processos de projeto evolutivos com variados estágios de automação - mais que uso de uma técnica ou tecnologia, o processo de projeto passa a caracterizar-se por métodos

complexos definidos por vários tipos de técnicas e variadas tecnologias digitais em único projeto. No processo de projeto, diversas sequências de decisão caracterizam-se pelo uso de variadas técnicas computacionais automatizadas, semiautomatizadas e manuais. Essa variedade no nível de automação no processo de geração da forma permite a exploração de conhecimentos formais, baseados em sistemas computacionais avançados (por exemplo, o uso de Algoritmo Genético, Simulated Annealing, Extended Evolutionary Structural Optimization) integrados com conhecimentos subjetivos, definidos por uma morfogênese não formal, baseados em processos mentais do arquiteto.

- Building Information Modeling como condição para a existência do projeto performativo – a existência de multiplicidade de tipos de dados e informações de projeto agregados a um modelo digital parametrizado torna possível a experimentação e transformação da forma arquitetônica de maneira mais eficiente e efetiva, viabilizando o uso de métodos performativos de geração da forma. Para isso, as duas tecnologias que estão na fundação do BIM, que são interoperabilidade e a modelagem paramétrica digital (EASTMANN *et al.*, 2008), tornam-se chaves para o prosseguimento do projeto. Só por meio do BIM, é possível estabelecer um nível de integração e *feedback* necessário para as decisões iniciais de projeto (EASTMANN *et al.*, 2008). Por meio do BIM é possível estabelecer novos fluxos de informação e integração dos estágios de Geração, Representação, Avaliação e Otimização/ Desempenho.
- Processo de projeto topológico substituindo tradição tipológica – ao partir de método de transformação e geração da forma guiada essencialmente por questões de desempenho, faz-se necessária a substituição do pensamento genérico e tipológico por um pensamento essencialmente não tipológico e não determinístico, apoiado no conceito de diferenciação e discrição (OXMAN, 2007). Por meio de exploração do desempenho como propulsor da morfogênese, é possível estabelecer novas relações formais, não como resultado da exploração de vocabulários formais, mas como consequência de novas teorias de exploração da matéria, apoiada numa nova estética que está aliada à ética e tem como pressuposto a sustentabilidade ambiental e a economia dos novos edifícios.

6.6 Múltiplos Modelos: uma abordagem baseada no desempenho

Antes de finalizar este capítulo, faz-se necessário estabelecer uma relação entre dois modelos de projeto digitais propostos por Oxman (2006): *CAD Model* e *Performance Model*. O que se observou nos estudos de caso foi que esses dois modelos foram utilizados de modo simultâneo, para resolução de diferentes sistemas (ou partes) de um mesmo edifício. No projeto do Museu Louvre Abu Dhabi, por exemplo, além de usar um método baseado no modelo performativo para o desenvolvimento do projeto da cúpula, foi utilizado um método baseado no Modelo CAD para Avaliação no desenvolvimento dos espaços funcionais do museu.

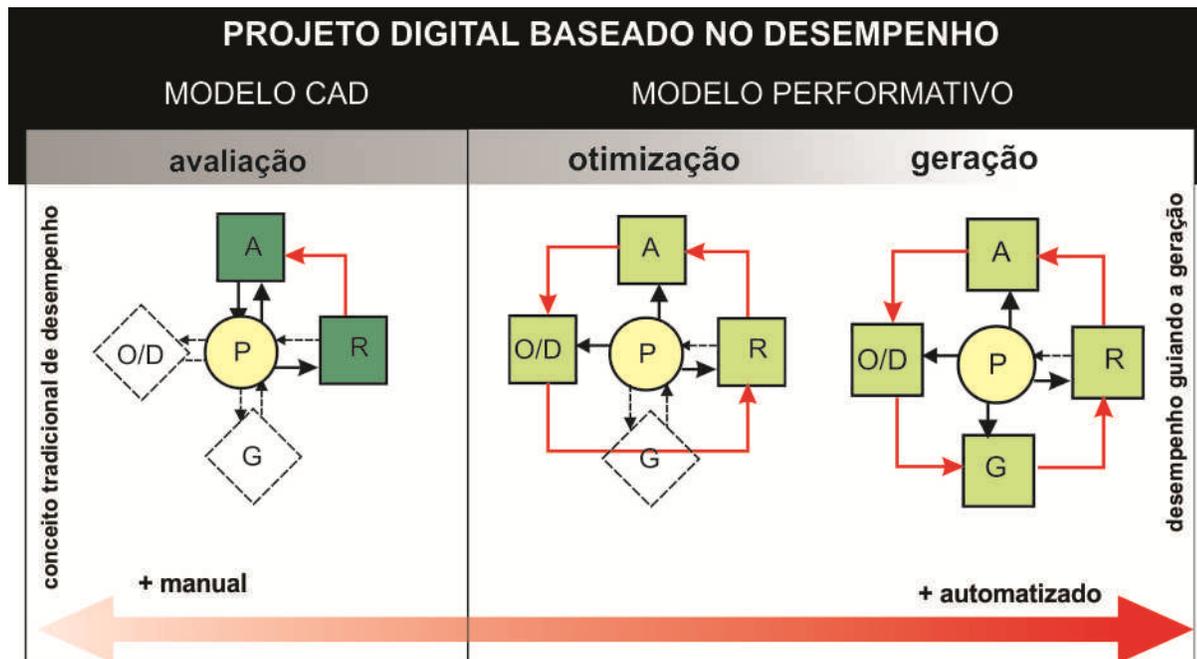
Nesta seção se discutirá a convivência de múltiplos modelos de projeto digital no desenvolvimento do projeto do edifício. A compreensão de como ocorre essa coparticipação é importante para entender que o modelo performativo não significa exclusão de outros modelos; mas, sim, que ele convive harmoniosamente como outros em uma prática multidimensional, multivariada, que envolve alta complexidade.

6.6.1 Instâncias do conceito de desempenho aplicado ao projeto

O Modelo de CAD para Avaliação e o Modelo Performativo representam duas instâncias do conceito de desempenho aplicado ao projeto. O modelo CAD para avaliação associa-se a processos mais implícitos de projeto, em que a geração da forma é controlada pelo projetista, que a manipula e altera de modo implícito. No modelo performativo, simulações vão dirigir a otimização/geração da forma.

A Figura 6.25 mostra essas duas abordagens. Nela o projeto digital baseado no desempenho é classificado em dois dos modelos digitais propostos por Oxman (2006). No Modelo CAD, está associando ao conceito tradicional de desempenho. Constitui-se de mecanismos de avaliação automática da solução. No modelo performativo, o desempenho aparece guiando o processo de formação. Constitui-se de mecanismos de otimização e geração da forma arquitetônica, com base em critérios de desempenho.

Figura 6.25 Modelos de projeto digital baseados no desempenho



Fonte: Autoria própria

6.6.2 Múltiplos métodos: visões diferenciadas de desempenho

Embora esses dois modelos discutidos representem visões distintas do conceito de desempenho aplicado ao projeto, uma das características observadas nos estudos de caso é que os métodos baseados nos Modelos Performativos ocorrem, em geral, simultaneamente ao uso de outros métodos baseados no Modelo de CAD para Avaliação. Constatou-se, nos estudos de caso e na revisão bibliográfica, que, durante o processo de geração da forma do edifício, utilizaram-se vários métodos para resolução de diferentes partes dele. Dentre os estudos de caso realizados neste trabalho e apresentados no Capítulo 5, apenas em dois projetos os métodos englobaram a geometria de todo o edifício. Mesmo assim, limitada a alguns sistemas.²⁵ Nos demais casos, limitou-se a uma cobertura, a uma parte específica do edifício ou a fachadas.

²⁵ Na Extensão da Hochschule für Technik, os sistemas gerados limitaram-se às lajes e paredes; no Rolex Learning Center (EPFL), às lajes de piso e de cobertura.

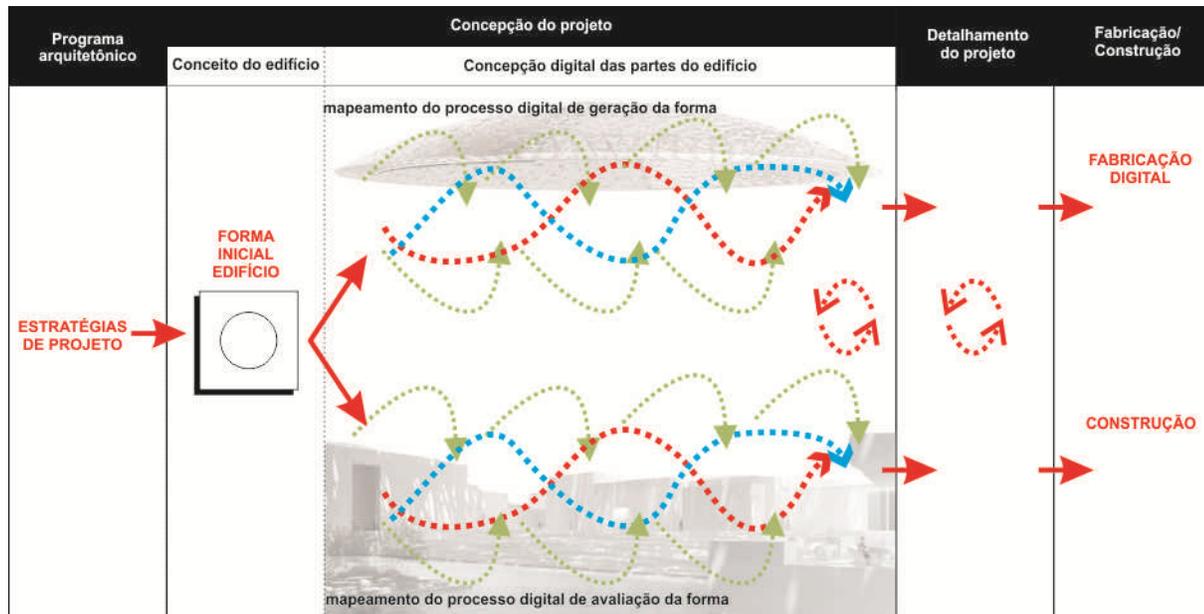
Nesses casos, utilizaram-se outros métodos na resolução de demais partes do edifício. Em alguns desses, como no Qatar National Convention Centre ou no Louvre Museum Abu Dhabi, por exemplo, utilizaram-se vários softwares de avaliação ambiental auxiliando na redução do consumo energético, e, em alguns casos, implicando alterações da forma do edifício.

Nas áreas em que eram exigidas novas funções e formas inovadoras, não tipológicas, observou-se o uso de métodos baseados no modelo performativo. Nos setores mais convencionais, que utilizavam configurações espaciais mais tipológicas, empregaram-se métodos baseados no Modelo CAD. Nesses últimos, os Modelos CAD para Avaliação estão cada vez mais presentes e permitem melhorar a eficiência do edifício e reduzir os custos da construção, do uso e da manutenção. Eles são utilizados na avaliação de diferentes tipos de desempenho, como desempenho acústico, térmico, consumo energético, custo, eficiência estrutural, entre outros (EASTMAN *et al.* 2008, 2011), e retroalimentam a atividade projetiva.

Essa abordagem de múltiplos métodos baseados em vários modelos de projeto digital permite segmentar a complexidade do projeto, com o uso simultâneo de métodos convencionais (modelo CAD para avaliação), em áreas do projeto definidos por tipologias mais tradicionais, com métodos semiautomatizados (modelo performativo) para partes do projeto mais topológicas e complexas.

A Figura 6.26 mostra a representação de um processo de projeto baseado numa abordagem caracterizada por mais de um modelo de projeto digital. Nessa figura, o processo de concepção da forma do edifício caracteriza-se pelo uso de dois métodos de projeto definidos por dois modelos distintos de projeto digital: Modelo Performativo Baseado na Geração e Modelo CAD para Avaliação.

Figura 6.26 Representação esquemática do uso de múltiplos modelos de projeto digital durante a geração da forma das partes do edifício



Fonte: Autoria própria

Projeto como esse, em geral, caracteriza-se por processos distintos de trabalho, muitas vezes, definidos por diferentes equipes de projeto, que, em alguns momentos, se entrecruzam e trocam dados dos seus processos visando estabelecer a relação entre eles. No modelo performativo baseado na geração, por estar relacionado com formas topológicas, muitas vezes complexas, em geral, faz uso de fabricação digital e subsequente montagem dos componentes no canteiro de obras. No modelo de geração de avaliação, por serem formas baseadas em tipologias mais convencionais, e por, em geral, estarem relacionados com estruturas maiores e mais complexas, geralmente estão vinculadas à fabricação convencional e construção no canteiro de obras.

6.6.3 Múltiplos métodos: domínios formais X sistemas de conhecimento

Modelos performativos por serem utilizados no processo de concepção da forma, utilizam, geralmente, estruturas geométricas não tipadas e topológicas. A informação, neste caso, está acoplada diretamente nas ferramentas de simulação e não à geometria. Isso acontece pois

trabalham com formas ainda muito pouco amadurecidas e precisam ter algo grau de flexibilidade (Quadro 6.1).

Quadro 6.1 Diferenças entre Modelos Performativos e CAD para Avaliação

Modelo		Informação	
Performativo	"Não tipado"	Topológico	Acoplada à ferramentas de simulação
CAD para avaliação	"Tipado"	Tipológico	Acoplada ao modelo

Fonte: autoria própria

Já Modelos CAD para Avaliação, como são baseadas em formas pré-concebidas na mente do arquiteto e representadas em um modelo digital estão, em geral, associados à modelos tipados, em modelagens tipológicas e já possui uma série de informações acopladas ao modelo. Essas informações são essenciais para que mecanismos de avaliações possam agir sobre os modelos.

Ao se trabalhar com múltiplos modelos e métodos de projeto digital baseados no desempenho, é possível incorporar a flexibilidade da exploração de certos tipos de desempenho na geração da forma, o que é algo essencial para a investigação em novos campos formais; sem deixar de lado todo um sistema de base de conhecimento, que podem estar acoplado a um modelo tipado e pode possibilita investigações em campos formais já conhecidos. O uso de plataformas BIM, por sua vez, pode servir como meio para associar esses múltiplos modelos em um ambiente computacional integrado.

6.7 Considerações

A definição de uma Estrutura Conceitual de modelo de projeto digital performativo, apresentada neste capítulo, serve como um meio de mapeamento das características desse paradigmático modelo de projeto digital. Esse se constitui num instrumento metodológico de estudo da prática de Projeto Performativo e como ferramenta para especulações sobre novas possíveis formulações metodológicas na área. Esse modelo permite demonstrar a complexidade do projeto digital, definido por um projeto essencialmente colaborativo e constituído por diferentes interações entre projetistas e os componentes do projeto digital.

Com a compreensão do projeto digital como um processo complexo que pode abarcar diferentes modelos digitais, este capítulo apresenta uma estrutura de processo de projeto digital constituída por modelos digitais concebidos sob diferentes enfoques do conceito de desempenho. Essa estrutura possibilita mapear o processo de projeto digital como constituído por diferentes modelos digitais, que são utilizados na concepção da forma de diferentes sistemas funcionais de um edifício.

Tendo como base a estrutura conceitual proposta neste trabalho, o próximo capítulo apresenta e discute a aplicação do modelo performativo em uma experiência de projeto.

7 PROJETO PERFORMATIVO: no atelier de projeto

Another of my dreams is to produce modern, innovative structural design techniques that unite structural rationality (logic), aimed at safety and economy based on universal engineering, with artistry (sense), aimed at creating new environments that prioritize comfort and sculptural beauty.

(Sasaki , 2005, p. 13)

7.1 Problema e Hipótese

Os estudos de caso apresentados no Capítulo 5 caracterizam-se por projetos desenvolvidos em equipes multidisciplinares, com uma extrema colaboração entre arquitetos e engenheiros estruturais, ainda nos primeiros estágios do processo de geração da forma. Alguns desses profissionais possuem alta capacidade em programação computacional. Diferentemente, os processos de projetos convencionais, baseados em Modelos CAD Descritivo, relacionam-se com uma prática pouco colaborativa, em que os projetistas conversam entre si apenas em estágios avançados do processo de projeto, quando a forma inicial já foi concebida (EASTMAN, 2009).

Nos ateliês de projeto dos cursos de arquitetura e urbanismo da maioria das universidades brasileiras, a realidade não é diferente (KOS *et al.*, 2006). Com exceção de algumas práticas pontuais de projetos colaborativos, na maioria dos casos, a concepção da forma é

desenvolvida pelo estudante de arquitetura sem uma discussão prévia com profissionais de outras áreas sobre o desempenho do edifício e suas consequências na geração da forma. Discussões, quando ocorrem, são, em geral, posteriores, corriqueiramente avaliativas.

Fundamentado nessa abordagem, este capítulo investiga o uso do Modelo de Projeto Digital Performativo em experiência de atelier de projeto de um curso de arquitetura e urbanismo. A hipótese levantada é que processos de projeto baseados em Modelos Performativos, desenvolvidos em grandes equipes colaborativas também podem ser aplicáveis eficazmente em atelier de projeto de cursos de arquitetura e urbanismo, apesar das limitações e restrições presentes nas práticas de projetos desses ateliers. A aplicação do método será considerada eficaz, nestes trabalhos, se resultar no efeito desejado de estimular a geração da forma, de modo criativo e considerando os desempenhos estabelecidos em projeto.

Dentre as limitações e restrições da prática de projeto em atelier, nos cursos de arquitetura e urbanismo, podem-se citar: a não utilização de uma prática sistemática de projetos colaborativos entre estudantes de arquitetura e outros profissionais que deem suporte à prática de projeto; o conhecimento limitado, ou nenhum, em script e no uso de ferramentas computacionais voltados para uma prática baseada em desempenho (ver seção 7.2.3); problemas de projeto geralmente abstratos, e soluções com pouco vínculo com a tectônica arquitetônica; projetistas pouco experientes, pois ainda são estudantes; tempo usado na realização de projeto limitado a poucas semanas (geralmente parte de um semestre).

Diante de todas essas limitações e restrições que tornam os processos de projeto presentes nas práticas dos ateliês de arquitetura diferentes das características das estruturas conceituais propostas no capítulo anterior, buscou-se identificar a existência de métodos que pudessem simular alguns elementos da realidade de projeto performativo, que, portanto, pudessem ser utilizados para uma prática baseada no modelo performativo.

O ponto de partida foi a realização de uma série de análises em métodos, técnicas e ferramentas computacionais utilizadas nos estudos de caso, apresentados no Capítulo 5, visando identificar aquelas que pudessem ser operacionalmente viáveis utilizar em um ateliê de projeto de curso de arquitetura e urbanismo. Ou seja, buscou-se identificar ferramentas computacionais que não precisassem ser programadas computacionalmente, visando adaptar-se a uma realidade

de projeto, que pudessem reproduzir o papel de outros projetistas, servindo como um “interlocutor virtual” durante uma “pseudoprática” colaborativa.

Após analisar diversos métodos, constatou-se que muitos deles exigiam conhecimento profundo em programação computacional e capacidade avançada de manipulação de softwares. Por outro lado, foi possível identificar uma ferramenta computacional empregada em um método semelhante ao utilizado no Estudo de Caso 6. Acredita-se que essa ferramenta, pela sua simplicidade de uso e por não exigir um conhecimento profundo em manipulação de software nem em script, poderia ser utilizada em um processo de projeto performativo aplicado em atelier de projeto de curso de arquitetura e urbanismo.

A ferramenta computacional em questão denomina-se BESO 3D (para Rhinoceros) e é uma implementação do método denominado *Bi-directional Evolutionary Structural Optimization* (BESO) (ver Capítulo 2, seção 2.4.2.3).

7.2 A Pesquisa Experimental

7.2.1 Plano experimental da pesquisa

Caracterizados o problema e a hipótese, partiu-se para a definição do plano experimental da pesquisa. O plano experimental utilizado nesta fase da pesquisa denomina-se como de “mão única” (GIL, 1996), pois se caracteriza pela manipulação de uma única variável independente (Quadro 7.1). A variável é: “Modelos Digitais Performativos podem ser aplicáveis em experiências de projeto desenvolvidos em atelier nos cursos de arquitetura e urbanismo”. Para isso a experiência foi testada comparativamente em ateliê de projeto.

Quadro 7.1 Plano experimental da pesquisa

Modelos Digitais Performativos podem ser aplicáveis em experiências de projeto desenvolvidos em atelier nos cursos de arquitetura e urbanismo				
Aplicam E1	Aplicam E2	Aplicam E3	Aplicam E4	Aplicam E5
Resultados na variável dependem da avaliação dos processos e produtos				

Fonte: Autoria própria

O experimento visou responder a algumas questões relacionadas com a variável – “o experimento vai ou não conseguir reproduzir o Modelo Performativo de projeto digital, em um nível de complexidade diferente do identificado nos estudos de caso?” Se for, então as soluções resultantes apresentam uma qualidade arquitetônica mínima, capaz de tornar o método aceitável para ser utilizado em atelier de projeto? O desempenho das soluções de cada uma das equipes é parecido em termos de capacidade de resolução do problema de projeto ou não? Caso não seja, quais elementos podem interferir nesse processo? Qual o nível de dificuldade dos alunos na manipulação dos softwares usados para implementar o método? Qual o nível de dificuldade dos alunos em absorver e utilizar a nova metodologia de projeto? O tempo de trabalho para realização das atividades de projeto é maior de que nos métodos baseados nos Modelos CAD?

Nesse experimento optou-se por trabalhar em todas as equipes com um mesmo processo de projeto em vez de comparar processos distintos. A justificativa dessa estratégia se apoia no fato de que a utilização de processos de projeto distintos implicaria realidades de processos de projeto e de produtos diferentes, o que poderia tornar a análise comparativa falha e os resultados incoerentes. Ao optar pela utilização de uma mesma estratégia de processo de projeto, a ser aplicada em distintas equipes, foi possível comparar o desempenho das equipes e os níveis de facilidade e dificuldade na utilização dos métodos. Comparando os trabalhos das equipes, foi possível identificar se existia coerência nas ações projetuais, utilizando o método proposto.

7.2.2 Determinação do experimento: atividades desenvolvidas

O experimento consistiu em uma atividade de ateliê de projeto do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade Estadual de Campinas (FEC/ UNICAMP). Esse ateliê ocorreu durante três aulas e fez parte do programa da Disciplina AU 120 (Projeto Integrado e Colaborativo). O objetivo geral da experiência era introduzir na disciplina o conceito de Projeto Performativo por meio de experiência que contemplasse uma prática baseada nesse conceito.

Para preparar os alunos para o exercício do ateliê, realizaram-se seminários e ministraram-se aulas teóricas sobre projeto digital, modelos performativos, arquitetura performativa e BESO. Para o aprofundamento sobre arquitetura performativa, os alunos apresentaram e discutiram vários capítulos do livro “Performative architecture” (KOLAREVIC; MALKAWI, 2005) nas aulas de número 3 e 4. De posse de conhecimento teórico e de exemplos sobre a prática da "arquitetura performativa", os alunos desenvolveram, entre a quinta e a sétima aula da disciplina, a experiência de ateliê de projeto propriamente dita. Na oitava aula, foram apresentados os produtos dessa experiência.

A experiência de ateliê de projeto abordada neste trabalho consistiu na realização de projeto arquitetônico, em nível de estudo preliminar, para a construção do Laboratório Central de Tecnologia de Alto Desempenho (LaCTAD) da Unicamp. Como condicionantes do projeto, foi dado o terreno, o programa de necessidades, contendo os ambientes e as áreas, e algumas exigências de projeto.

Como exigências do projeto, estavam a implantação de quatro blocos pré-fabricados, a serem adquiridos pela Unicamp para os laboratórios do LaCTAD, locação de estacionamento e realização do projeto arquitetônico para abrigar o curso de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Médicas da Unicamp, um espaço de convivência, e áreas administrativas, vinculadas aos laboratórios (Quadro 7.2). Todo esse programa deveria estar locado em um único terreno. Como dados de entrada, passaram-se para os alunos o programa arquitetônico, o dimensionamentos do terreno, com as curvas de nível, os projetos dos blocos pré-fabricados (em arquivos CAD, 2D, e Modelos BIM, 3D - em .rvt) e algumas diretrizes de implantação dos edifícios.

Quadro 7.2 Quadro de áreas existentes e estimadas, projeto arquitetônico LaCTAD

Área dos blocos pré-fabricados			
Área total bloco	Área pav. tipo bloco	Número de blocos	Área total projeção blocos
2.940 m ²	980 m ²	4	3.920 m ²
Áreas setores novos			
Área Pós-graduação	Área Convivência	Área administrativa	Área total a ser projetada
474 m ²	245 m ²	165 m ²	884 m ²
Área aproximada estacionamento			5.000 m ²
Área total terreno			16.429 m ²

Fonte: Autoria própria

Após a preparação teórica, no primeiro dia de ateliê, denominado de Aula 1 (Figura 7.1), foi solicitado que os alunos trouxessem: maquete do terreno com as curvas de nível; planta de situação com indicação dos seus principais condicionantes do entorno; maquete dos quatro blocos pré-fabricados (na mesma escala da maquete do terreno); todo o material possível e necessário para realizar desenho, construção e manipulação dos volumes conceituais dos edifícios.

Figura 7.1 Fotos da Aula 1 realizada em 9 de setembro de 2011



Fonte: Autoria própria

No segundo e terceiro dia de ateliê, as Aulas 2 e 3 (Figura 7.2) ocorreram no laboratório de informática e consistiu em exercícios de exploração formal de volumetrias definidas na Aula 1, utilizando-se como critério principal de geração da forma, o desempenho estrutural. Nessas duas aulas os alunos foram introduzidos, receberam treinamento e passaram a utilizar o software BES03D (para Rhinoceros).

Figura 7.2 Fotos da Aula 2 e 3 realizadas em 16 e 23 de setembro de 2011



Fonte: Autoria própria

Como produtos da entrega, exigiram-se maquetes (maquete do terreno contendo as maquetes dos blocos pré-fabricados e da implantação proposta); memorial justificativo; material

gráfico (plantas, cortes, fachadas das propostas, além de esboços, croquis, diagrama, mostrando o processo evolutivo).

7.2.2.1 O software

O software BESO3D (para Rhinoceros) foi desenvolvido pelo Innovative Structures Group (ISG) da RMIT University, que é constituído por um grupo de especialistas em engenharia estrutural e arquitetura, que busca aprofundar a colaboração e a inovação em experiências de projeto e aplicação. Esse grupo é uma iniciativa do Professor Mike Xie da RMIT University e Peter Felicetti da Pty Ltd Consulting Engineers (INNOVATIVE STRUCTURES GROUP, 2009).

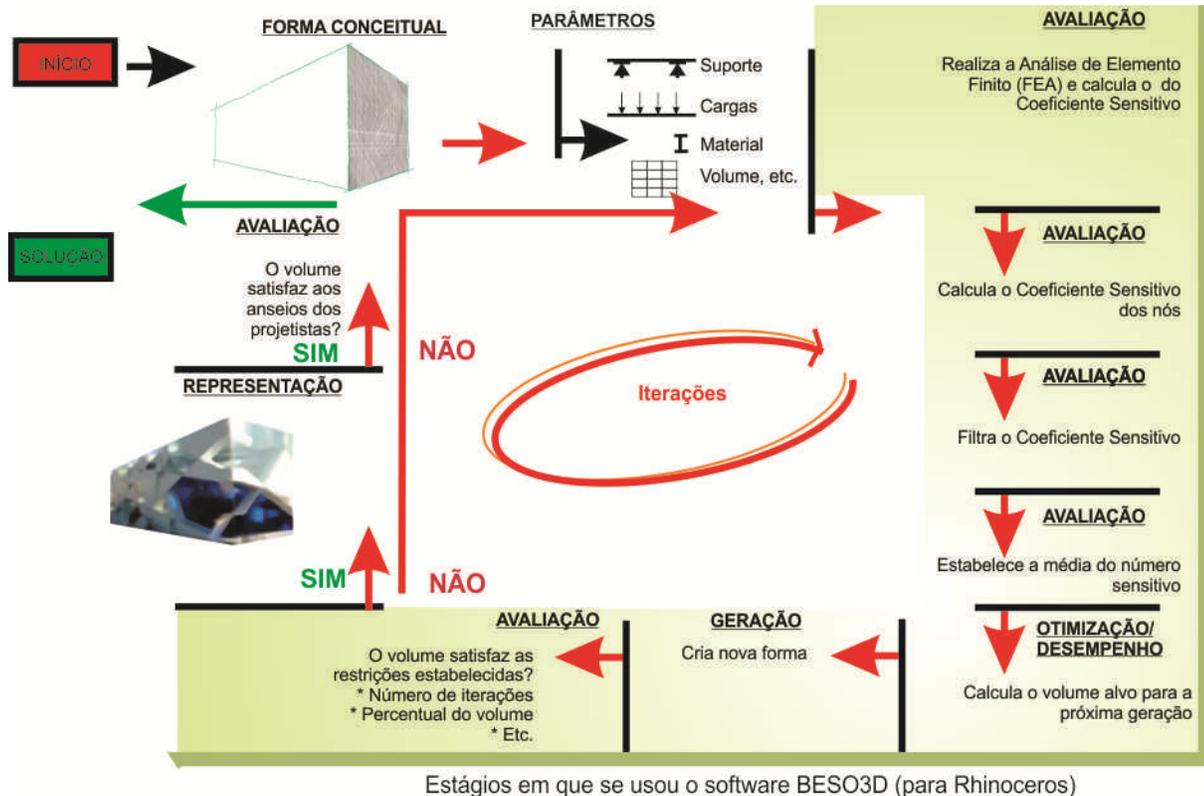
O BESO3D (para Rhinoceros) é um software desenvolvido para a otimização topológica de estruturas bi e tridimensionais usando os mais recentes algoritmos para o BESO (HUANG; XIE, 2010). Esse software constitui-se num pacote que contém duas partes principais: um plug-in para o software Rhinoceros (BESO.rhp) e um programa para realizar o método BESO (BESO.exe). O plug-in do Rhinoceros modifica os objetos construídos nesse programa em um modelo reconhecido no software BESO.exe e lê os resultados da otimização, transformando as soluções geradas em objetos tridimensionais visíveis no Rhinoceros. O motor independente BESO.exe realiza a análise FEA e a otimização, usando para isso o método BESO. (INNOVATIVE STRUCTURES GROUP, 2009).

7.2.2.2 O método

Pela limitação da aplicação do software BESO3D (para Rhinoceros), o método é indicado para ser utilizado na geração de três sistemas: paredes; invólucros do edifício; pilares. Na aula teórica sobre o Método BESO, mostraram-se alguns exemplos de sua aplicação em projetos de arquitetura (ver imagens Figura 2.10).

Durante a aula teórica também foi mostrado um desenho esquemático do processo de geração da forma de um invólucro usando o Método BESO (Figura 7.3). Note-se que a parte acentuada em verde claro representa os estágios do ciclo de decisão que são automatizados pela ferramenta BESO3D (para Rhinoceros).

Figura 7.3 Processo de geração da forma usando o Método BESO



Fonte: Autoria própria

7.2.3 Determinação dos sujeitos

A população estudada era constituída por estudantes do décimo semestre (quinto ano) do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Ao todo, foram 28 alunos distribuídos em cinco equipes.

7.2.3.1 Nível de experiência dos estudantes em Software

Como não existia nenhum tipo de pré-requisito em habilidade computacional para a realização da disciplina AU 120 (Projeto Integrado e Colaborativo), antes do início da experiência, realizou-se entrevista, por meio de questionário, visando identificar o nível de

conhecimento dos alunos no uso de ferramentas computacionais (Apêndice C). Para tanto, solicitou-se que os alunos respondessem sobre seu nível de conhecimento em software. Com base nas habilidades individuais, foi possível identificar como as equipes estavam constituídas em termos de habilidades no manuseio de softwares. O Quadro 7.3 mostra o nível de conhecimento da turma e das equipes, individualmente, no uso de softwares para projeto. Note-se que a maioria tem conhecimento intermediário ou avançado nos aplicativos de representação AutoCAD e Sketch UP. Softwares de autoria BIM, como o Revit Architecture ou o ArchiCAD são pouco conhecidos pela turma e os usuários têm pouca experiência.

Quadro 7.3 Nível de experiência dos estudantes em softwares de representação, de avaliação e de autoria BIM: número total de alunos (turma) e por equipe

SOFTWARE	TURMA				EQUIPE 1				EQUIPE 2			
	NS	INI	INT	AVA	NS	INI	INT	AVA	NS	INI	INT	AVA
AutoCAD	0	0	14	9	0	0	3	0	0	0	3	2
Revit Architecture	17	5	1	0	2	1	0	0	4	1	0	0
ArchiCAD	19	4	0	0	2	1	0	0	5	0	0	0
VectorWorks	21	1	1	0	2	0	1	0	5	0	0	0
SketchUp	0	1	13	9	0	0	3	0	0	0	3	2
3DS Max	6	12	5	0	0	3	0	0	1	4	0	0
Rhinoceros	13	7	3	0	2	1	0	0	2	3	0	0
Grasshopper	20	2	1	0	3	0	0	0	3	2	0	0
Visual-Basic	22	0	1	0	2	0	1	0	5	0	0	0
Ecotect	21	2	0	0	3	0	0	0	5	0	0	0
EnergyPlus	22	1	0	0	3	0	0	0	5	0	0	0
Dialux	15	2	6	0	3	0	0	0	2	0	3	0
Fluids	22	1	0	0	3	0	0	0	5	0	0	0

SOFTWARE	EQUIPE 3				EQUIPE 4				EQUIPE 5			
	NS	INI	INT	AVA	NS	INI	INT	AVA	NS	INI	INT	AVA
AutoCAD	0	0	3	2	0	0	3	1	0	0	2	4
Revit Architecture	3	1	1	0	3	1	0	0	5	1	0	0
ArchiCAD	4	1	0	0	2	2	0	0	6	0	0	0
VectorWorks	5	0	0	0	4	0	0	0	5	1	0	0
SketchUp	0	0	3	2	0	1	2	1	0	0	2	4
3DS Max	2	2	1	0	0	2	2	0	3	1	2	0
Rhinoceros	4	0	1	0	2	2	0	0	3	1	2	0
Grasshopper	5	0	0	0	4	0	0	0	5	0	1	0
Visual-Basic	5	0	0	0	4	0	0	0	6	0	0	0
Ecotect	5	0	0	0	2	2	0	0	6	0	0	0
EnergyPlus	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0
Dialux	1	2	2	0	3	0	1	0	6	0	0	0
Fluids	4	1	0	0	4	0	0	0	6	0	0	0

Nota: Número de entrevistados = 23 alunos. NS - Não sabem; INI - Iniciantes; INT - Intermediários; AVA - Avançados

Fonte: Autoria própria

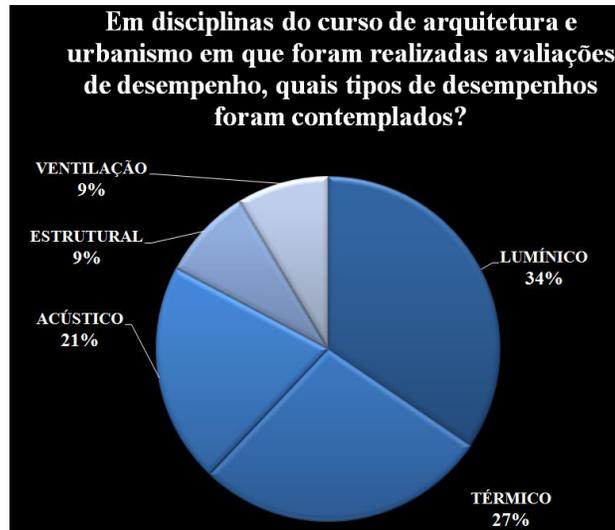
Outros softwares de autoria BIM e de análise, como o Digital Project, o Bentley Architecture, o Vasare, o Generative Components, o Ecodesign, o Solibri, o CFD, o Ansys, o Odeon, o Rstab, o GSA e o Strand também fizeram parte do questionário. Porém, nenhum dos alunos tinha qualquer experiência ou conhecimento no uso desses softwares.

Os dados apresentados acima servem para comprovar quão limitado é o conhecimento dos alunos no uso de ferramentas computacionais. Softwares usados em prática baseada em desempenho não são do conhecimento dos alunos. Os dados indicam também que o perfil da habilidade dos alunos é para uma prática baseada no Modelo CAD Descritivo.

Outra questão visou saber se os alunos já haviam realizado algum tipo de avaliação de desempenho, e 91% dos alunos responderam que já haviam passado por algum tipo de avaliação de desempenho. Essas avaliações ocorreram para mais de 75% dos alunos nas disciplinas de acústica, lumínica, térmica, etc. A Figura 7.4 mostra os principais desempenhos avaliados em disciplinas anteriores.

Perguntou-se também aos alunos se já haviam participado de atividades de projeto extracurriculares em colaboração com outros profissionais. Caso sim, que tipo de agentes estava envolvido na experiência? Ao que 77% dos alunos responderam já ter participado de experiências de projetos com a colaboração de outros profissionais. Desses mais de 50% dos agentes são engenheiros, outros são designers, fabricantes, fornecedores. Embora os relatos não mostrem uma participação direta no processo de criação, indicam como suas decisões interferem na concepção arquitetônica, por conseguinte, no processo de projeto.

Figura 7.4 Categorias de avaliações de desempenho contempladas em experiências de disciplinas do curso de arquitetura e urbanismo



Fonte: Autoria própria

7.2.4 Revisão da população estudada

O experimento contou inicialmente com 28 alunos distribuídos em cinco equipes. A ideia inicial era realizar o experimento com todas as equipes. Todavia, após a realização das atividades, resolveu-se limitar a população a 18 alunos, distribuídos em três equipes. O motivo dessa redução foi em virtude de duas das equipes não terem cumprido as solicitações estabelecidas no experimento. As duas excluídas, além de não realizarem todas as etapas do experimento, não apresentaram o produto solicitado no prazo estabelecido; portanto, foram desconsideradas da análise. O novo plano experimental da pesquisa incluiu apenas as equipes E2, E4 e E5 (Quadro 7.4).

Quadro 7.4 Plano experimental da pesquisa revisado

Modelos Digital Performativos podem ser aplicáveis em experiências de projeto desenvolvidos em atelier nos cursos de arquitetura e urbanismo		
Aplicam E2	Aplicam E4	Aplicam E5
Resultados na variável dependem da avaliação dos processos e produtos		

Fonte: Autoria própria

7.2.5 Determinação do ambiente

O experimento realizou-se nos seguintes ambientes: sala de aula de prancheta (Aula 1, com cerca de 2 horas e 30 minutos); laboratório de informática (Aulas 2 e 3 em torno de 2 horas cada); e em atividades extrassala de aula, que se realizaram durante as três semanas, período entre as três aulas. O Quadro 7.5 apresenta: as principais atividades realizadas nas Aulas 1, 2 e 3, o tipo de análise utilizada na avaliação dos resultados (discutida na próxima seção), algumas das técnicas empregadas pelos alunos, o local onde ocorreram as experiências e a duração. O tempo de projeto de cada experiência corresponde ao tempo médio de início e finalização das atividades de projeto. Durante as aulas, outras atividades ("burocráticas") eram realizadas, mas não foram computadas no tempo total de aula. Assim, o tempo total de exercício de projeto em sala de aula foi de cerca de seis horas, divididas em três semanas de aulas.

Quadro 7.5 Quadro síntese das atividades, análises, técnicas, local e duração dos experimentos

	Primeira semana Classe	Segunda semana Classe	Terceira semana Classe	Apresentação
<i>Atividade</i>	Discussão Desenho/ esboço Observação Cálculo (áreas programa) Manuseio (maquetes físicas) Manipulação (massa modelar, papéis) Relacionamento Teste	Compreensão (funcionamento programa) Experimentação Teste	Discussão Desenho/ esboço Observação Experimentação Teste	
<i>Tipo de análise</i>	Protocolo	(Não realizada)	Protocolo	
<i>Técnicas</i>	Desenho à mão livre manipulação de maquete Construção maquete	Desenho em CAD, BESO	Desenho em CAD, desenho à mão livre, BESO	
<i>Local</i>	Sala prancheta	Laboratório informática	Laboratório informática	
<i>Duração</i>	2h30m	2h	2h	

Fonte: Autoria própria

A primeira aula realizou-se em 9 de setembro de 2011, na Sala AU317 do prédio azul da FEC-Unicamp. A aula teve início às 19 horas. A segunda e terceira aulas realizaram-se em 16 e

23 de setembro de 2011, na Sala 10 do Laboratório de Informática da FEC-Unicamp. Ambas se iniciaram também às 19 horas.

7.2.6 Procedimentos de análise e interpretação dos dados

Entre as técnicas mais comuns para análise das ações cognitivas dos projetistas, destacam-se as análises de protocolo (OXMAN, 1995; SUWA; PURCELL; GERO, 1998; SUWA; TVERSKY; GERO, 2001; TANG, 2001). Tradicionalmente, as análises de protocolos relacionam-se com experimentos laboratoriais utilizando técnicas, em alguns casos, “microscópicas” (SUWA; PURCELL; GERO, 1998), que consistem em modos sistemáticos de identificar ações cognitivas dos projetistas nos estágios do processo de projeto, de modo a reconhecer as estruturas primitivas de ações dos projetistas. Apesar da validade desse tipo de análise para a compreensão das principais ideias dos projetistas, as técnicas são geralmente utilizadas em experiências pontuais de projeto (deixando o projetista isolado num laboratório por um curto intervalo de tempo), representando uma realidade diferente das presentes nos ateliês de projeto dos cursos de arquitetura e urbanismo.

Por outro lado, técnicas como análise de conteúdo (OLABUÉNAGA; ISPIZUA, 1989) são comumente usadas para descrever e interpretar, por meio de descrições sistemáticas, o conteúdo. Essas experiências, embora não se mirem na compreensão total das ações cognitivas, fornecem instrumentos para análise de produtos.

Visando compreender melhor produtos, processos e suas relações, o experimento desenvolvido em sala de aula foi analisado por meio do uso de procedimentos usados na análise de protocolo, com ênfase no uso de técnicas de análise de conteúdo. As técnicas de análise de protocolo, segundo Dorst e Dijkhuis (1995), são abordagens orientadas a processos e abordagens orientadas a conteúdo. A primeira consiste em descrever a estrutura dos processos de projeto, em termos de perfil do processo, operadores, planos de trabalho, objetivos, estratégias projetuais, etc. (DORST; DIJKHUIS, 1995). A abordagem orientada a conteúdo visa revelar o conteúdo das informações, os recursos e os conhecimentos que são usados para fazer inferências. Destacam-se no uso dessas técnicas Schon e Wiggins (1992), Goldschmidt (1991), Suwa e Tversky (1997), etc. A abordagem orientada a conteúdo, por estar mais associada à

interação cognitiva do projetista com o processo de representação, será a técnica foco desta pesquisa.

As técnicas de análise de conteúdo constituem-se de metodologias de análise qualitativa de conteúdo, por meio de um conjunto de passos, segundo os quais, um conteúdo pode ser concebido e aplicado. Ela se constitui das seguintes etapas: preparação das informações; unitarização ou transformação do conteúdo em unidades; categorização; descrição; e interpretação, com análises e discussões em cima dos resultados (MORAES, 1994).

Para avaliação das ações dos projetistas, utilizou-se uma técnica de análise de protocolo baseada no registro retrospectivo (*retrospective report*). Essa técnica consiste, de acordo com Suwa, Purcell e Gero (1998), em solicitar ao sujeito que lembre e relate seus pensamentos após a realização das suas tarefas. O ponto negativo é que, em razão da deterioração da memória, as informações recuperadas da memória são seletivas (ERICSSON, 2002). Para reduzir esse problema, utilizou-se a estratégia sugerida por Suwa e Tversky (1997), que consiste em reproduzir imagens e gravações das atividades realizadas pelos projetistas, e, baseado nelas, solicitar que eles relatem seus pensamentos passados enquanto executava aquelas tarefas. As imagens do processo de projeto foram obtidas por meio de fotos, que registraram diferentes momentos das atividades de projeto nas aulas; e, para as aulas realizadas em laboratório, *printscreens* das telas dos computadores, em intervalos de tempo programados e fixos para todas as equipes (a cada 15 minutos). Esses procedimentos, segundo Suwa, Purcell e Gero (1998), permitem fornecer pistas visuais sobre as sequências das atividades que foram realizadas, as dúvidas, os retrabalhos, os pensamentos, os tipos de interação, etc. Essas informações visuais foram usadas para ajudar a compreender a motivação das suas ações.

Para a análise dos resultados, mapearam-se a movimentação dos sujeitos, durante o processo de resolução de problemas (SUWA; PURCELL; GERO, 1998). Para tanto, foi necessário fazer um processo de segmentação de protocolos visuais e alguns verbais, baseados nas metas e intenções mais comuns dos projetistas, de modo que os protocolos “brutos” pudessem ser divididos em seguimentos. Além disso, estabeleceram-se categorias de ações cognitivas. Essas foram utilizadas para quantificar, e visaram sistematizar e analisar as ações cognitivas dos sujeitos. Neste trabalho, utilizaram-se as categorias de ações cognitivas propostas por Suwa, Purcell e Gero (1998), que são: físicas, perceptivas, funcionais e conceituais.

A categoria física se refere às ações que resultam na representação física no papel (desenho), no espaço (maquete) e no meio digital (representação digital). Suwa, Purcell e Gero (1998) propõem três categorias de ações físicas. Essas foram adaptadas nas seguintes categorias: desenho no papel ou no computador (fazer diagramas, figuras, símbolos, anotações, memorandos, frases, etc.; modificar desenho (alterar propriedades do desenho no papel ou no computador); mover e copiar objetos representados, tentando extrair novas informações. Além dessas, foram inclusas duas outras categorias: movimentação de objetos simbolizando construções (que ocorreu quando os alunos movimentaram modelos físicos sobre a maquete do terreno); e construção de objetos tridimensionais, representando objetos reais (construção de maquetes usando massas de modelar, pedaços de papel e outros materiais).

A categoria perceptual refere-se às ações de atendimento, às características visuais e espaciais dos elementos representados nas maquetes e nos esboços. Suwa, Purcell e Gero (1998) subdividem essa categoria em três subclasses: a primeira compreende observar as características visuais dos elementos (formas, tamanhos e texturas); a segunda visa compreender as relações espaciais entre os elementos (proximidade, afastamento, alinhamento, interseção, conectividade, etc.); a terceira visa descobrir as organizações entre mais de um elemento (por meio de agrupamento de elementos semelhantes, uniformidade, diferença, etc., descobrir novos tipos de relação).

A categoria funcional refere-se às ações de conceber as informações não visuais expressas nos elementos visuais. Suwa, Purcell e Gero (1998) subdividem essa categoria em duas subclasses: a primeira consiste nas questões relacionadas com as interações dos artefatos projetados com as pessoas ou a natureza ao redor (circulação mínima exigida, dimensões de conforto, iluminação adequada, etc.). A segunda se refere às ações funcionais relacionadas com as reações psicológicas das pessoas quando interagem com o espaço.

A quarta categoria, conceitual, refere-se, de acordo com Suwa, Purcell e Gero (1998), às ações cognitivas que não estão diretamente relacionadas com representações físicas ou características visuais e espaciais dos elementos. Essa categoria divide-se em três subcategorias. A primeira refere-se a preferências do projetista (gosta ou não gosta) ou avaliação estética (feio-bonito, bom-ruim, etc.). A segunda diz respeito às metas. Essas podem ser ativadas em função de preferências ou em decorrência de certos aspectos funcionais. A terceira categoria se refere ao conhecimento. Relaciona-se com o raciocínio. Suwa, Purcell e Gero (1998) apresentam dois tipos

de raciocínio ligados a essa subcategoria: no primeiro, o conhecimento é usado para gerar informações por meio de conhecimentos precedentes; no segundo tipo, o conhecimento é usado para dividir um problema em subproblemas. Em ambos, a recuperação do conhecimento e sua aplicação envolvem a produção de novas informações, de um modo *top-down* (SUWA; PURCELL; GERO, 1998).

As quatro categorias de ações cognitivas propostas por Suwa, Purcell e Gero (1998) foram adaptadas e estão representadas no Quadro 7.6. Nele são indicadas: as categorias; as subcategorias; as abreviaturas das categorias que serão usadas na segmentação; as descrições das subcategorias; e exemplos de ações incluídas nessas subcategorias.

Com essas categorias, buscou-se identificar nas ações projetuais os principais processos cognitivos empregados durante a geração da forma dos edifícios, tentando verificar a flexibilidade do método de lidar com mudanças, com o inesperado, com o incomensurável, a possibilidade de pensar soluções dúbias e a qualidade das soluções chegadas.

Além de analisar as ações, foram avaliados os produtos apresentados pelas equipes, confrontando o desempenho estrutural e funcional com a qualidade estética e espacial das soluções apresentadas. Entre os requisitos de avaliação das soluções, podem-se destacar: qualidade da evolução do partido arquitetônico, adequação do projeto aos condicionantes programáticos, qualidade do partido arquitetônico, em termos de identidade visual da proposta, qualidade funcional, qualidade do dimensionamento dos espaços, contextualização com os aspectos ambientais e atendimento ao programa de necessidades. O Quadro 7.7 mostra os critérios empregados nas avaliações das propostas.

Quadro 7.6 Categorias de ações cognitivas usadas nas análises de protocolo

Categorias	Subclasse	Abr.	Descrição	Exemplo
Física	Desenhar	F-d	Desenhar no papel ou na tela do computador	Linhas, círculos, traços, setas, palavras, etc.
	Modificar	F-m	Modificar desenho	Mudar forma, tamanho, textura do desenho, por meio de edição de elementos do desenho
	Deslocar	F-l	Mover ou copiar desenhos	Copiar uma forma múltiplas vezes ou mover, rotacionar, espelhar, etc.
	Movimentar	F-t	Mover ou deslocar objetos físicos	Mover a maquete de um edifício sobre a maquete de um terreno
	Construir	F-c	Construção de objetos tridimensionais	Usando massa de modelar, papel, barbante ou outro meio, cortar, colar, movimentar, objetos sobre outro, simbolizando uma construção num terreno
	Copiar	F-p	Cópia ou múltiplas cópias de desenho	Faz cópias ou múltiplas cópias de representação, no papel ou no computador
	Configurar	F-g	Estabelece regras e restrições	Interage com mecanismo computacional estabelecendo regras e restrições
	Implementar	F-i	Gera representação digital	Interage com mecanismo computacional gerando representação digital
	Visualizar	F-v	Visualiza representação digital	Interage com mecanismo computacional para visualizar representação digital
Perceptual	Observar	P-o	Observar características	Observar características visuais dos elementos, como proximidade, afastamento, alinhamento, etc.
	Compreender	P-c	Compreender relações espaciais	Compreender relações espaciais entre elementos, como proximidade, afastamento, alinhamento, eixos, etc.
	Descobrir	P-d	Descobrir organizações	Descobrir organizações entre elementos, a partir de agrupamentos de elementos semelhantes, uniformidades, diferenças, etc.
Funcional	Adequação	U-a	Adequação das representações às funções planejadas,	Verificar se as funções planejadas nos desenhos e representações se adaptam às condições de conforto mínimo
	Satisfação	U-s	Satisfação psicológica	Verificar se as funções planejadas nos desenhos e representações se adaptam ao conforto psicológico do usuário
Conceitual	Preferência	C-p	Avaliação das preferências	Avalia preferências: gosta-não gosta, feio-bonito, bom-ruim
	Metas	C-m	Determinação das metas	Metas para resolver conflitos, para aplicação de funções, para organização
	Conhecimentos	C-c	Utilização de conhecimentos	Conhecimentos para gerar informações a partir de precedentes e para subdividir problemas.

Fonte: Autoria própria

Quadro 7.7 Critérios de avaliação do produto

Critério avaliação	Explicação
Identidade visual	Unidade e coerência visual das novas construções com o entorno e entre elas e suas partes
Qualidade funcional	Atendimento aos requisitos do programa arquitetônico. Qualidade da distribuição espacial e da conectividade dos espaços. Acessibilidade
Dimensionamento	Atendimento aos requisitos do programa e às dimensões mínimas. Eficiência no dimensionamento dos espaços
Exequibilidade	Facilidade de construir. Economia de meios, eficiência no uso de materiais, etc.
Qualidade estética	Boa relação escala, proporção, cheios/vazios, claro/escuro, etc. Qualidade da relação formal entre as partes do(s) edifício(s) novo(s) e entre este(s) e os blocos pré-fabricados
Contextualização	Contextualização com o entorno. Relação formal entre os edifícios projetados e o entorno. Preocupação com os aspectos ambientais
Exploração BESO	Utilização de modo apropriado do método BESO. Exploração do desempenho estrutural como motor de geração da forma.

Fonte: Autoria própria

Para a avaliação dos produtos, seguiu-se o seguinte procedimento: solicitou-se a cinco projetistas, professores de projeto, que julgassem os trabalhos dos alunos com base nos critérios de avaliação apresentados acima. Critérios como qualidade funcional e qualidade estética, nesse estágio inicial de processo de projeto, ainda eram muito subjetivos. Por meio de consulta a profissionais da área, com conhecimentos e repertórios em projeto e em ensino, foi possível se chegar a um nível mínimo de confiabilidade nas avaliações; mesmo sem existir um rigor metodológico de informações técnicas de projeto, que ainda não estavam disponíveis nesse estágio de projeto. A nota da avaliação foi dada com base na média da nota dos juízes.

Na fase final, fizeram-se análises e interpretação dos dados coletados. Com essas análises, buscou-se identificar as vantagens e limitações do uso do método utilizado nesse exercício de projeto. As avaliações ocorreram de modo separado e conjunto, confrontando os processos e produtos utilizados pelas diferentes equipes na resolução do problema de projeto.

7.2.7 Coletas de dados

Os dados coletados foram agrupados em duas categorias: dados referentes ao processo e ao produto. Os dados referentes ao processo são oriundos de: filmagens dos processos de projeto, fotos de registro das atividades do projeto, *PrintScreen* das telas dos computadores (nas aulas realizadas nos laboratórios), filmagens das apresentações, com a narração dos alunos sobre as experiências de projeto, questionário e entrevista (com filmagens dos depoimentos dos alunos). Os dados referentes aos produtos foram extraídos de: maquetes, memorial justificativo e material gráfico (plantas, cortes, fachadas, perspectivas, esboços, diagramas, etc.).

7.3 Análises dos Experimentos

7.3.1 Categorização e descrição

De posse das informações coletadas, partiu-se para a etapa de análise. Inicialmente selecionou-se e classificou-se o material geral e por equipe. Procurou-se reduzir o perfil da informação para tornar o processo de trabalho mais simplificado e claro. Para reduzir a complexidade das informações extraídas, resolveu-se limitar as análises de protocolo à primeira e à terceira aula. Como a segunda aula foi introdutória ao uso do software, não trouxe efetivas contribuições para a análise do processo de projeto. Estabeleceu-se, então, a codificação do material de modo a identificar cada elemento da amostra.

Os procedimentos utilizados na análise das experimentações compreenderam uma série de passos que se iniciaram com a segmentação das ações projetivas e finalizaram com análise dos produtos. Essas análises dos processos e produtos forneceram informações suficientes para especular o papel dos métodos, das técnicas e softwares no processo de projeto e seus efeitos nas soluções arquitetônicas geradas.

O primeiro passo consistiu na definição dos segmentos primitivos de ações, indicando a categoria, o conteúdo e a sequência. O processo de projeto das Aulas 1 e 3 foram categorizados por meio da segmentação. O procedimento consistiu em segmentar cada aula em quatro

momentos. Em cada um deles, identificaram-se as mais importantes categorias de ações projetuais utilizadas durante o processo de geração da forma. Mediante essas ações, identificaram-se as principais diretrizes que deveriam nortear as decisões projetuais.

Em seguida, no processo de projeto, identificaram-se as categorias geométricas usadas, as técnicas, os softwares e o nível de automação no processo de geração da forma. Para finalizar, realizou-se a análise dos produtos. De posse da análise dos processos e dos produtos, foi possível estabelecer uma série de relações de causa e efeito entre ações e decisões projetuais. Buscou-se, com isso, identificar como métodos, técnicas e ferramentas influenciaram as ações cognitivas usadas no processo de decisão.

Nas próximas seções, apresenta-se a análise dos experimentos, que compreende: análise do processo de projeto da aula 1; análise do processo de projeto da aula 3; análise das geometrias usadas; análise das técnicas e softwares; análise dos modelos digitais e níveis de automação usados nos modelos digitais; análise do produto.

7.3.2 Processos de projeto: Aula 1

7.3.2.1 Equipe E2

O Quadro 7.8 mostra-se os quatro segmentos, com as respectivas categorias analisadas, durante a aula de 9 de setembro de 2011. Os horários definidos nos quadros indicam a hora de início de cada segmento. Os segmentos dos protocolos visuais para as categorias perceptual, funcional e conceitual encontram-se no Apêndice B.

A Equipe 2 iniciou o processo de projeto discutindo o programa de necessidades, dimensionamento e organização espacial. Mesclou ações de movimentação das maquetes dos blocos pré-fabricados sobre a maquete do terreno, com croquis que refletiram o amadurecimento das principais decisões projetuais. Fez uso, em diversos momentos, do esboço para afirmar posições e dar ênfase aos aspectos projetuais principais. No primeiro segmento, as ações físicas relacionavam-se mais com o dimensionamento e movimentação das maquetes dos blocos pré-fabricados sobre a maquete do terreno (Quadro 7.8). No último segmento, as ações se

relacionavam mais com o amadurecimento da proposta com uso de diversos esboços para testar possíveis distribuições e relações espaciais.

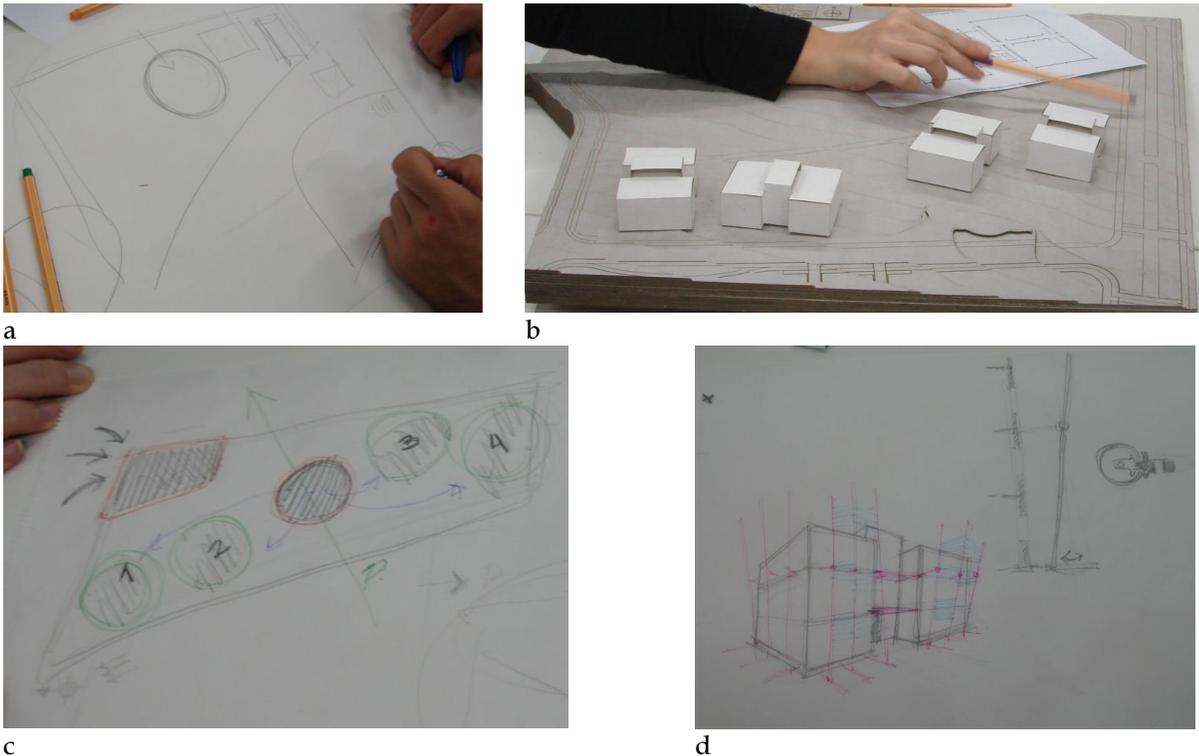
Quadro 7.8 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 2, Aula 1)

Categoria Física			
Segmento 1 (19h30)		Segmento 2 (20h5min)	
<i>Abr.</i>	<i>Conteúdo</i>	<i>Abr.</i>	<i>Conteúdo</i>
F-d	Escreve programa e possíveis agrupamentos	F-d	Desenha eixos visuais, bolhas com agrupamentos de soluções
F-d	Desenha figuras correspondentes à área necessária	F-t	Movimenta maquetes dos blocos, testando relações de proximidade, afastamento, alinhamento
F-t	Desloca maquetes dos blocos pré-fabricados na maquete do terreno	F-c	Constrói planos com áreas correspondentes aos blocos
F-t	Movimenta blocos pré-fabricados agrupando-os no terreno	f-t	Realinha os blocos dois a dois
		F-d	Desenha corte com curvas de nível
		F-d	Escreve no computador os pontos que iam sendo discutidos
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h15)	
F-d	Escreve no computador os pontos que iam sendo discutidos	F-m	Modifica características dos eixos, define com bolhas a distribuição espacial dos blocos pré-fabricados, do novo edifício, do estacionamento e das áreas de convivência (Figura 7.5c)
F-d	Desenha blocos agrupados		
F-d	Desenha corte no terreno com curvas de nível	F-d	Desenha possíveis soluções formais para a proposta
F-d	Define com retas os eixos principais do projeto (Figura 7.5a)	F-d	Desenha invólucro para os blocos pré-fabricados
F-d	Desenha com círculo ponto focal	F-d	Desenha possível estrutura do invólucro dos blocos pré-fabricados e detalhe de fixação da estrutura (Figura 7.5d)
F-t	Movimenta os blocos na maquete, agrupando-os (Figura 7.5b)	F-d	Desenha plantas do novo edifício com indicação de vazios
F-d	Desenha área para possível implantação do estacionamento	F-m	Modifica esboços.
F-d	Desenha bolhas indicando o zoneamento dos blocos no terreno		

Fonte: Autoria própria

A Figura 7.5 mostra fotos de algumas das ações físicas realizadas pelos alunos da Equipe 2 durante as atividades no ateliê. As atividades mesclaram entre discussões, esboços, croquis e movimentação dos modelos dos blocos pré-fabricados sobre as maquetes do terreno.

Figura 7.5 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011 (Equipe 2, Aula 1)



Fonte a, b, c, d: Autoria própria

As principais ações perceptuais da Equipe 2 durante a Aula 1 de ateliê estiveram relacionadas com a observação, compreensão e percepção das características do terreno, do entorno e de maneiras de ocupação do terreno, considerando a disposição dos blocos pré-fabricados e sua relação com os demais blocos.

As principais ações funcionais estiveram relacionadas ao estudo do dimensionamento e a disposição dos ambientes funcionais no terreno, nos segmentos 1 e 2, e estudo das relações funcionais vinculadas a acessibilidade, afastamentos, recuos, bem como aos efeitos psicológicos das ações projetuais, nos segmentos 3 e 4.

Muitas discussões conceituais permitiram amadurecer as ideias de projeto. Por meio de metas, proposições e avaliações estabeleceram-se os principais conceitos da proposta arquitetônica. Esses conceitos discutidos foram expressos por meio de diagramas e esboços de projeto. Os diagramas expressaram as principais ideias utilizadas no projeto, porém ainda não se tinha, naquele momento, uma noção precisa sobre a geometria dos edifícios.

Após um processo de amadurecimento da proposta, expressa nas categorias de ações apresentadas acima, chegou-se a algumas decisões projetuais que influenciaram as demais etapas do projeto. Essas decisões foram:

- a Pós-Graduação, área coletiva e café da Faculdade de Ciências Médicas da Unicamp deverão estar distribuídos em um único edifício;
- áreas de lazer e pedestres foram posicionadas de acordo com o fluxo principal de pedestres e de veículos;
- os estacionamentos deverão estar localizados em edifício subterrâneo, visando liberar espaço no terreno para áreas verdes;
- novo edifício deverá seguir uma forma orgânica contrastando com os edifícios pré-fabricados existentes;
- os blocos pré-fabricados serão agrupados em duplas;
- o método BESO será aplicado na geração da forma do café, que aparecerá como um elemento simbólico, destacando-se dos demais edifícios.

7.3.2.2 Equipe E4

A Equipe 4 iniciou o processo de projeto compreendendo e discutindo o programa de necessidades. O primeiro segmento dos protocolos visuais para a categoria de ação física consistiu em muita discussão de possíveis partidos arquitetônicos e pouca ação física (Quadro 7.9). No segundo segmento, a equipe passou a tentar posicionar os blocos pré-fabricados no terreno e discutiu modos de articulação das edificações. Paralelamente, começou-se a esboçar em duas dimensões um novo bloco para abrigar a Pós-Graduação, área coletiva e café da Faculdade de Ciências Médicas e possíveis disposições no terreno. No terceiro segmento, realizou-se croqui representando a forma ensejada para o novo edifício. Também se esboçou uma estrutura que visava servir como elemento integrador do novo edifício com os blocos pré-fabricados. No quarto segmento, tentou-se materializar a ideia numa maquete em papel.

A Figura 7.6 mostra imagens de algumas das ações físicas realizadas pela Equipe 2 durante a aula 1. Além de muitas discussões, alguns croquis foram realizados visando encontrar uma forma que pudesse expressar um ideário de projeto. Também foram estudados em planta

possíveis arranjos espaciais, com a movimentação de folhas de papel milimetrados com as áreas do programa e plantas dos blocos pré-fabricados sobre a planta do terreno (Figura 7.6b).

Quadro 7.9 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 4, Aula 1)

Categoria Física			
Segmento 1 (19h40)		Segmento 2 (20h10)	
<i>Abr.</i>	<i>Conteúdo</i>	<i>Abr.</i>	<i>Conteúdo</i>
F-d	Escreve programa	F-c	Corta plantas dos blocos pré-fabricados
		F-t	Movimento blocos na folha, procurando achar melhor distribuição
		F-t	Agrupa blocos pré-fabricados dois a dois no terreno
		F-d	Esboça forma do novo edifício e disposição no terreno
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h10)	
F-d	Desenha área em que novo edifício deverá estar localizado	F-c	Constrói objeto representando o novo edifício
F-d	Esboço possível volumetria de novo edifício (Figura 7.6a)	F-m	Move o novo edifício na maquete do terreno procurando posicioná-lo de modo mais apropriado (Figura 7.6b)
F-d	Refaz esboço tentando tornar a solução mais próxima da ideia discutida	F-c	Começa a construir maquete 3D do volume do novo edifício e elemento de cobertura que une os blocos.

Fonte: Autoria própria

Figura 7.6 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011 (Equipe 4, Aula 1)



a



b

Fonte: Autoria própria

Na Aula 1, diversas ações perceptuais realizaram-se visando definir a proposta conceitual, formas de implantação dos edifícios no terreno, relações espaciais entre edificações, etc.

As principais ações funcionais, realizadas durante os quatro segmentos estudados, estiveram relacionados com a disposição dos blocos pré-fabricados e da nova edificação no terreno em termos de dimensionamentos mínimos e conforto espacial.

Diferentemente da Equipe 2, que explorou muito o esboço, e por meio dele visualizou os principais eixos, nessa proposta a equipe discutiu muito e idealizou uma forma arquitetônica complexa para contemplar o novo edifício. Usou muitas referências de imagens de outros projetos, porém, explorou pouco a espacialidade idealizada. O principal motivo que limitou a exploração formal foi a reduzida capacidade de expressar graficamente esses ideais, que se constituíam por formas complexas. Observou-se no final do processo de projeto que a equipe discutiu muito as questões conceituais da forma e esboçou pouco, mas foi o suficiente para definir certas diretrizes para o encaminhamento da proposta.

No final da aula, a equipe havia chegado às seguintes decisões projetuais:

- os novos setores deverão ser contemplados em um único bloco; inicialmente a forma esboçada seria de um prisma de base hexagonal;
- esse bloco deverá ser verticalizado;
- pequenas praças deverão ligar os blocos existentes;
- a praça maior deverá servir de área de convívio e conectará com o novo edifício;
- os caminhos que ligam os blocos serão cobertos por uma estrutura orgânica que ora se fecha, ora se abre, integrando os espaços e dando unidade ao conjunto.

7.3.2.3 Equipe E5

As principais ações físicas realizadas pela Equipe 5 nos segmentos 1 e 2 foram de exploração formal (Quadro 7.10), por meio da manipulação das maquetes dos blocos pré-fabricados sobre a maquete do terreno e da malha quadriculada em 2 dimensões (que correspondia às dimensões das exigidas para as novas edificações). Também usaram massas de modelar, para o estudo de massas visando à implantação do novo edifício. Depois de muita discussão e exploração das possibilidades formais, definiram-se algumas diretrizes gerais de implantação. Nesse momento (segmento 3), elaboraram croquis, que expressam os principais

conceitos definidos durante a exploração formal. Ainda no segmento 3, exploram as possibilidades formais de articulação do novo edifício.

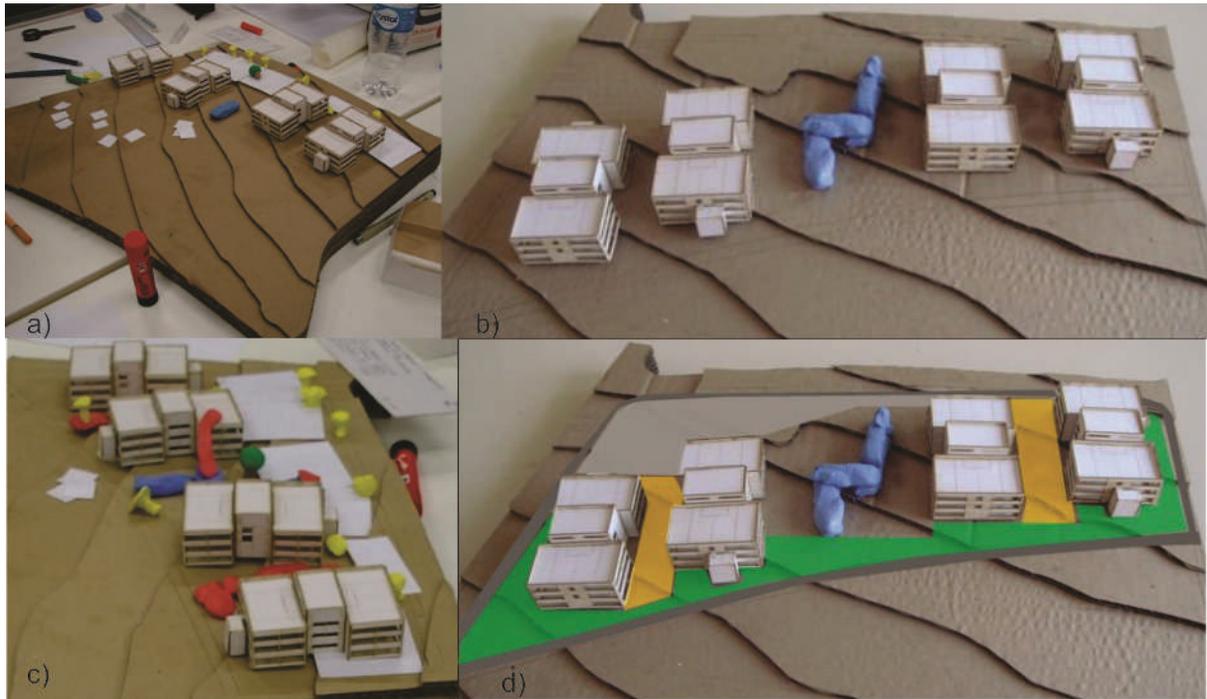
Quadro 7.10 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 5, aula 1)

Categoria Física			
Segmento 1 (19h20)		Segmento 2 19h50	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
F-d	Escreve programa e possíveis agrupamentos	F-t	Movimenta os blocos pré-fabricados, estuda opções de distribuição dos blocos
F-d	Desenha em papel malha quadriculada, definida por um módulo, que serviu para pré-dimensionar as áreas das projeções do novo edifício e áreas de estacionamento	F-c	Constrói em massa de modelar possíveis configurações de novo edifício (Figura 7.7b)
		F-t	Movimenta e agrupa pedaços de papel com dimensões e áreas correspondentes às exigidas no programa de necessidades (Figura 7.7c)
F-c	Corta retângulos com áreas correspondentes ao programa arquitetônico do novo(s) edifício(s)	F-t	Movimenta novo edifício, estuda possíveis formatos e posições
F-t	Movimenta blocos-pré-fabricados na maquete do terreno	F-d	Redesenha em papel novas formas para o novo bloco
F-t	Movimenta e agrupa pedaços de papel com dimensões e áreas correspondentes às exigidas no programa de necessidades	F-t	Movimenta novo bloco criado, estuda possíveis formatos e posições
Segmento 3 (20h20)		Segmento 4 (20h50)	
F-c	Define a distribuição para os blocos pré-fabricados, distribui retângulos com disposição dos estacionamentos	F-c	Testa solução final para o bloco novo
F-d	Esboça no papel solução estudada, com o zoneamento indicando os blocos pré-fabricados, novo edifício, áreas de estacionamento e suas relações (Figura 7.8a)	F-c	Desenvolve soluções para as áreas de convívio entre os blocos pré-fabricados e reestuda distribuição dos blocos pré-fabricados e novo edifício (Figura 7.7d)
F-m	Modifica o desenho estabelecendo novas relações e fortalecendo algumas ideias estabelecidas nas discussões	F-d	Esboça a solução nova com as disposições dos blocos pré-fabricados, as áreas de convívio, a disposição do novo bloco, os espaços de estacionamento e as áreas verdes
F-t	Movimenta os blocos e define as áreas de estacionamento e de convívio	F-d	Cria diagramas explicando as ideias-chave
F-c	Faz estudo de massa (massa de modelar) de possíveis opções para a volumetria do bloco novo (Figura 7.8b, c)	F-d	Descreve os principais pontos da proposta.
F-c	Testa opção de volumetria para o bloco novo		
F-c	Testa nova opção de volumetria para bloco novo		
F-c	Testa nova opção de volumetria para bloco novo		

Fonte: Autoria própria

A Figura 7.7 mostra o uso de maquetes, papel quadriculado com as dimensões das áreas definidas no programa e massa de modelar. Com a manipulação desses elementos sobre a maquete, estabeleceram-se as diretrizes iniciais para a proposta.

Figura 7.7 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011



Fonte: autoria própria

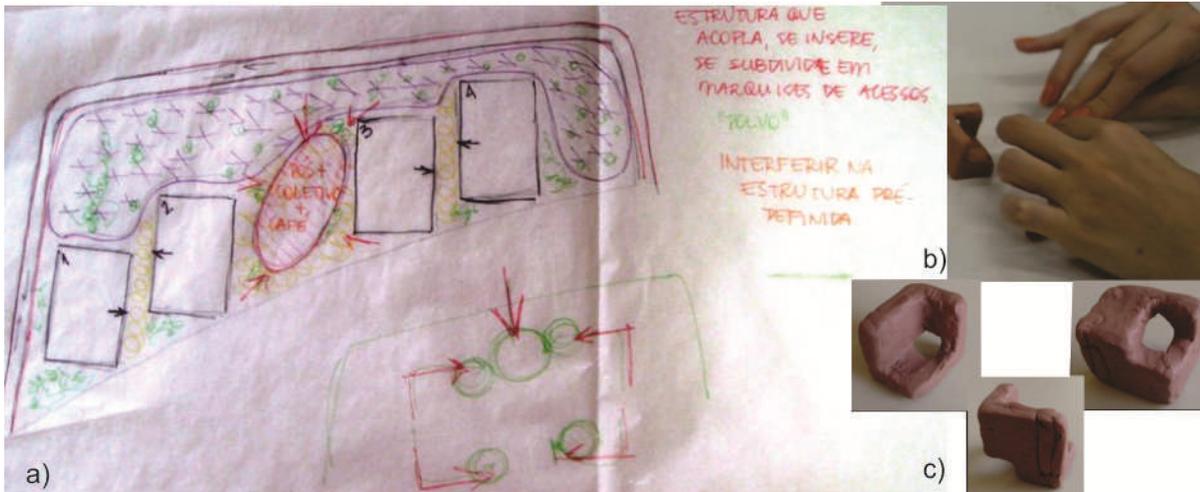
Definida a primeira distribuição espacial, a equipe realizou uma série de esboços no papel e, sobre esses esboços, traçou algumas diretrizes de projeto (Figura 7.8).

Entre as ações perceptuais realizadas pela Equipe 5, destacam-se: estudos de relacionamento entre os blocos pré-fabricados no terreno; possíveis locações das áreas para situar a nova edificação e os estacionamentos. Por meio do uso de técnicas, como o esboço, a confecção de maquetes volumétricas em massa de modelar e a movimentação do volume dos blocos pré-fabricados no terreno, foi possível realizar algumas descobertas e conjecturas.

O processo de investigação usado neste trabalho baseou-se em ações físicas comandadas por modelos tridimensionais em vez de esboços e croquis. O uso do esboço à mão livre aparece mais claramente apenas no segmento 3, depois de definidos os principais conceitos formais do projeto. As ações de percepção e investigação correm em cima de modelos físicos bi (plantas em papel) ou tridimensionais (maquetes de papel ou massa de modelar). Por outro lado, o uso dos

esboços à mão livre permitiu investigar mais claramente alguns aspectos da categoria funcional, como os dimensionamentos, os recuos, acessos, afastamentos e relação forma x função.

Figura 7.8 Imagens do processo de projeto da aula de 9 de setembro de 2011



Nota: a) o esboço foi usado visando sintetizar a solução; b) a massa de modelar foi usada nos estudos da forma do novo edifício

Fonte: autoria própria

A partir do segmento 3 as ações conceituais passaram a focar o novo edifício. As principais avaliações visaram encontrar o modo mais apropriado de implantar o novo edifício no terreno, de modo a destacá-lo dos demais.

Com base nas ações projetuais expressas nos segmentos apresentados acima, chegou-se às seguintes decisões projetuais:

- orientar os quatro blocos pré-fabricados, de modo que as áreas mais nobres ficassem na melhor orientação solar;
- cada dois blocos deveriam estar orientados, um de frente para o outro, de modo a criar pequenas praças;
- entre os dois agrupamentos, deveria ser criado um espaço central onde um novo edifício será construído, aglutinando o programa em único edifício que acompanha as curvas de nível;
- a área de estacionamento deveria localizar-se no perímetro do terreno;

- em razão da topografia acidentada, estudaram-se as formas de articular os vários blocos, de modo a interferir menos na topografia original do terreno.

7.3.2.4 Análises comparativas dos protocolos

Ao comparar os protocolos visuais para as categorias de ações físicas das equipes, o que se pode observar é que as Equipes 2 e 5 estabeleceram uma quantidade bem maior de tarefas, comparadas com a Equipe 4, durante todos os segmentos (Quadro 7.11). Essas ações projetuais físicas mais intensas por parte das Equipes 2 e 5 coincidiram com o nível de amadurecimento dos produtos dessas equipes. Na prática, observou-se que essas duas equipes tiveram maior amadurecimento na resolução da proposta durante o primeiro dia de aula.

Quadro 7.11 Número e categorias físicas das tarefas realizadas em cada Segmento na Aula 1

Segmento	Aula 1										Total Segmentos				
	S1			S2			S3		S4		E2	E4	E5		
Equipe	E2	E4	E5	E2	E4	E5	E2	E4	E5	E2	E4	E5			
Desenhar (F-d)	2	1	2	3	1	1	7		1	4	3	16	2	7	
Movimentar (F-t)	2		2	2	2	4	1		1			5	2	7	
Construir (F-c)			1	1	1	1		2	5		2	2	1	5	9
Modificar (F-m)								1	1	2	1		2	2	1
TOTAL	4	1	5	6	4	6	8	3	8	6	3	5	24	11	22

Fonte: Autoria própria

Com relação ao tipo de tarefa realizado pelas equipes, observou-se que a principal categoria de ações cognitivas físicas empreendidas pelas Equipes 2 e 5 foi a de "desenhar" (Quadro 7.11). Já a Equipe 4, empreendeu uma quantidade maior de ações na atividade de "construir". Enquanto as Equipes 2 e 4 concentraram ações em tarefas mais específicas, a Equipe 5 distribuiu as tarefas mais uniformemente entre desenhar, movimentar e construir.

Cada Equipe utilizou processos bem distintos de projeto. A Equipe 2 realizou diversas discussões sobre possíveis formas de implantação e morfologia dos blocos. Partiu de uma visão macro e, por meio de diagramas, eixos e zoneamentos, procurou definir as principais estratégias projetuais. No final da Aula 1, estabeleceram os pontos mais importantes do projeto, que serviram como diretrizes projetuais e estão presentes na proposta apresentada pela equipe. Nesse momento, ainda não se tinha definição clara da morfologia final.

A Equipe 4 realizou muita discussão durante os quatro segmentos. Realizou vários esboços visando definir um direcionamento formal para a proposta. No final da aula, estabeleceu algumas estratégias projetuais, porém algumas das definições ainda não estavam elucidadas, como a ideia de criar uma estrutura orgânica que fizesse a articulação dos blocos.

Diferentemente das duas outras, a Equipe 5 foi mais pragmática no sentido de estabelecer ações projetuais concretas. Iniciou com a criação de uma malha quadriculada com as dimensões do estacionamento e dos novos ambientes a serem projetados. Por meio da movimentação dos blocos pré-fabricados e da malha quadriculada, que foi dividida em pequenos pedaços de papel, estabeleceu-se o primeiro zoneamento do terreno. Desse momento em diante, utilizaram-se simultaneamente técnicas como o esboço e croquis aliados à confecção de volumes usando massas de modelar. No final da aula, chegou-se a um partido muito próximo da solução final.

7.3.3 Processos de projeto: Aula 3

7.3.3.1 Equipe E2

Na Aula 1, definiu-se que o BESO deveria ser usado para a geração da forma do Café. A implantação e o desenvolvimento das demais partes do projeto ocorreram durante as atividades extra-aulas. Nessa aula, definiu-se que a forma do café deveria ser orgânica, diferentemente das demais construções, destacando-se como ponto focal; porém, no início da Aula 3, a equipe ainda não tinha noção de como seria a forma. A ideia era que, depois de definida a forma do café, para as demais partes do novo edifício deveriam seguir uma linguagem parecida, visando uma unidade formal.

Definido o objetivo principal da Aula 3, iniciou-se o processo de geração da forma. No Quadro 7.12, mostra-se que nessa aula executou-se uma grande quantidade de ações físicas, resultado de uma série de tentativas de encontrar a forma.

Quadro 7.12 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 2, Aula 3)

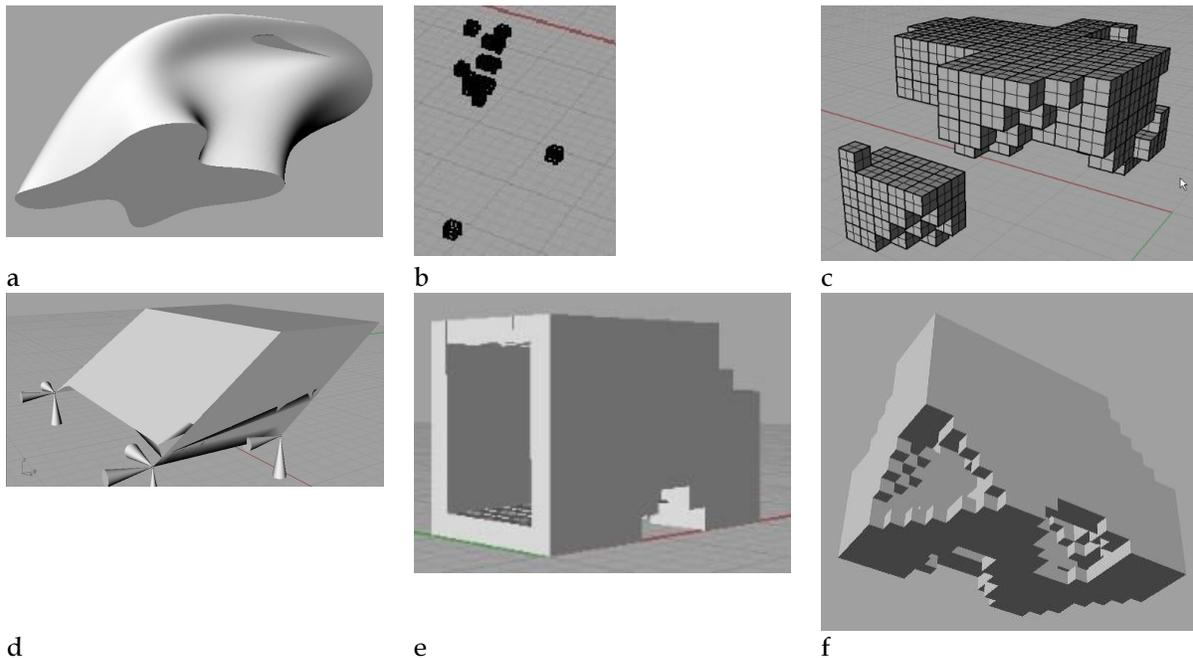
Categoria física			
Segmento 1 (19h30)		Segmento 2 (20h)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
F-d	Desenha forma complexa no software Rhino 3D, representando volume do novo edifício (Figura 7.9a)	F-t	Modificada no Rhino 3D curvaturas
F-p	Copia e cola forma no Rhino 3D	F-d	Desenha pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume no Rhino 3D
F-t	Modificada curvatura no Rhino 3D	F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.
F-t	Subtrai volume do interior no Rhino 3D	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-v	Vê mensagem de erro no BESO - forma não gerada
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-d	Desenha forma regular sólida no Rhino 3D
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume
F-v	Gera forma no BESO completamente diferente da original definida - sem clareza topológica (Figura 7.9b)	F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.
F-m	Modifica forma complexa no Rhinoceros 3D	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-t	Modificada curvatura no Rhino 3D	F-v	Gera forma no BESO completamente diferente da original definida - sem clareza topológica (Figura 7.9c)
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-d	Desenha no Rhino 3D nova forma complexa - prisma com eixo z inclinado (Figura 7.9d)
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-t	Subtrai volume do interior no Rhino 3D
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume
F-v	Vê mensagem de erro no BESO - forma não gerada	F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.
F-t	Modificada curvatura no Rhino 3D	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-v	Ainda no BESO se depara com mensagem de erro. Forma não gerada.
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-d	Desenha no Rhino 3D nova forma - prisma de base retangular
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-t	Subtrai volume do interior no Rhino 3D
F-v	Ainda no BESO se depara com mensagem de erro. Forma não gerada.		
Segmento 3 (20h30)		Segmento 4 (21h)	
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-v	Visualiza forma gerada (Figura 7.9e)
F-g	Configura propriedades da forma no	F-m	Modifica pontos, vetores das cargas e

	BESO – tipo de material, iterações, novo volume, etc.		locais dos apoios do volume no Rhino 3D
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-g	Configura propriedades da forma no BESO – tipo de material, iterações, novo volume, etc.
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-d	Esboça à mão possíveis variações		
F-d	Desenha nova forma no Rhino 3D – prisma de base retangular aberto nas extremidades	F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-m	Modifica pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume no Rhino 3D
F-g	Configura propriedades da forma no BESO – tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-g	Configura propriedades da forma no BESO – tipo de material, iterações, novo volume, etc.
		F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-i	Dá comando no BESO para implementar forma	F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.9f).

Fonte: Autoria própria

Com a criação de uma forma orgânica (Figura 7.9a) utilizando o software Rhinoceros, a Equipe 2 realizou uma série de testes com o BESO 3D (para Rhinoceros) tentando otimizar a estrutura da forma. Depois de diversos testes, a equipe percebeu que o software não conseguia iniciar a geração da forma por meio de uma volumetria complexa. As ações projetuais nos dois primeiros segmentos foram de tentativas e erros. Finalmente, iniciou-se a otimização do desempenho estrutural com formas menos complexas (aquelas formas mais próximas da geometria de matemática básica), obtendo-se os primeiros resultados. No terceiro e quarto segmentos, os alunos passam a explorar o potencial do BESO. Geradas as formas, elas foram avaliadas, alteradas e novamente geradas. Passou-se a gerar diversas soluções parecidas em curto intervalo de tempo.

Figura 7.9 Formas estudadas no BESO na aula de 23 de setembro de 2011 (Equipe 2)



Fonte: Elaborado pela Equipe 2 (Andrea Destefani, David Elsinger, Karla Baldasso, Sarah Martins e Sofia Belledonne)

Durante os dois primeiros segmentos, os alunos descobriram algumas das limitações do software para a realização de formas complexas. Com a percepção de como funciona o software, os alunos passaram a utilizar volumetrias mais simplificadas. No segmento 3, os alunos passam a descobrir a relação entre forças, estrutura e forma. No segmento 4, começam a descobrir e compreender a lógica formal do uso do método BESO.

Ao se definir que o edifício a ser estudado na Aula 3 seria o Café, passou-se a explorar a espacialidade da forma, sem uma limitação programática, uma vez que o café exigia baixa complexidade funcional. Apenas nos segmentos 3 e 4, discutiram-se alguns aspectos funcionais referentes à forma. Nos primeiros segmentos, as ações voltavam-se para a compreensão do mecanismo evolucionário propiciado pelo método BESO e seus efeitos na forma. Nesses dois primeiros segmentos, não se discutiram questões funcionais.

As duas aulas no laboratório não produziram mudanças significativas na estrutura conceitual da proposta definida na Aula 1. Com os testes da Aula 3, confirmou-se que a forma gerada no BESO seria a do Café. A ideia era que esse volume servisse como um marco referencial, destacando-se do entorno. A última forma gerada na Aula 3 ainda não foi a forma definitiva do Café.

Após essa aula, a equipe se reuniu, cerca de 3 vezes, para definir a forma definitiva do Café e do novo edifício. Nesse momento, a equipe define a localização do novo edifício e do café (que é uma extensão do novo edifício). Definiu-se que o café se localizaria no ponto mais alto do terreno, destacando-se, e se conectaria com a praça principal.

A forma inicial usada no projeto do café foi um volume maciço com pequena abertura. Foram cerca de três gerações até se chegar à forma final do café. Esse processo de trabalho era bidirecional. Ou seja, gerava-se a forma do café e, por ela, pensava-se a forma do novo edifício. Depois de esboçada a forma do novo edifício, voltava-se para o BESO, e com algumas mudanças de parâmetros, gerava-se nova forma; novamente voltava-se ao estudo do novo edifício. Durante todo esse processo, vários croquis e desenhos em CAD (AutoCAD, Sketch-up) serviram de base para discussões e reflexões.

7.3.3.2 Equipe E4

Diante da ideia amadurecida na primeira aula e com base em algumas limitações formais identificadas pela equipe no uso do BESO 3D (para Rhinoceros), na aula de 16 de setembro, a equipe passou a realizar uma série de explorações formais buscando chegar a uma geometria que pudesse ser utilizada como invólucro do novo edifício. Na aula desse dia, a equipe resolveu abandonar a ideia de partir de um prisma de base hexagonal e passou a trabalhar com um prisma de base retangular.

Entre os segmentos 1 ao 4 da categoria de ação física, criaram-se mais de 10 formas bem diferentes do ponto de vista da geometria e da estrutura (Quadro 7.13). Embora partissem de formas básicas (prisma de base retangular), foi possível chegar a uma variedade significativa de configurações formais (Figura 7.10). Durante cada segmento, novas descobertas eram feitas, implicando reformulações nas regras e diretrizes que impulsionavam a geração da forma.

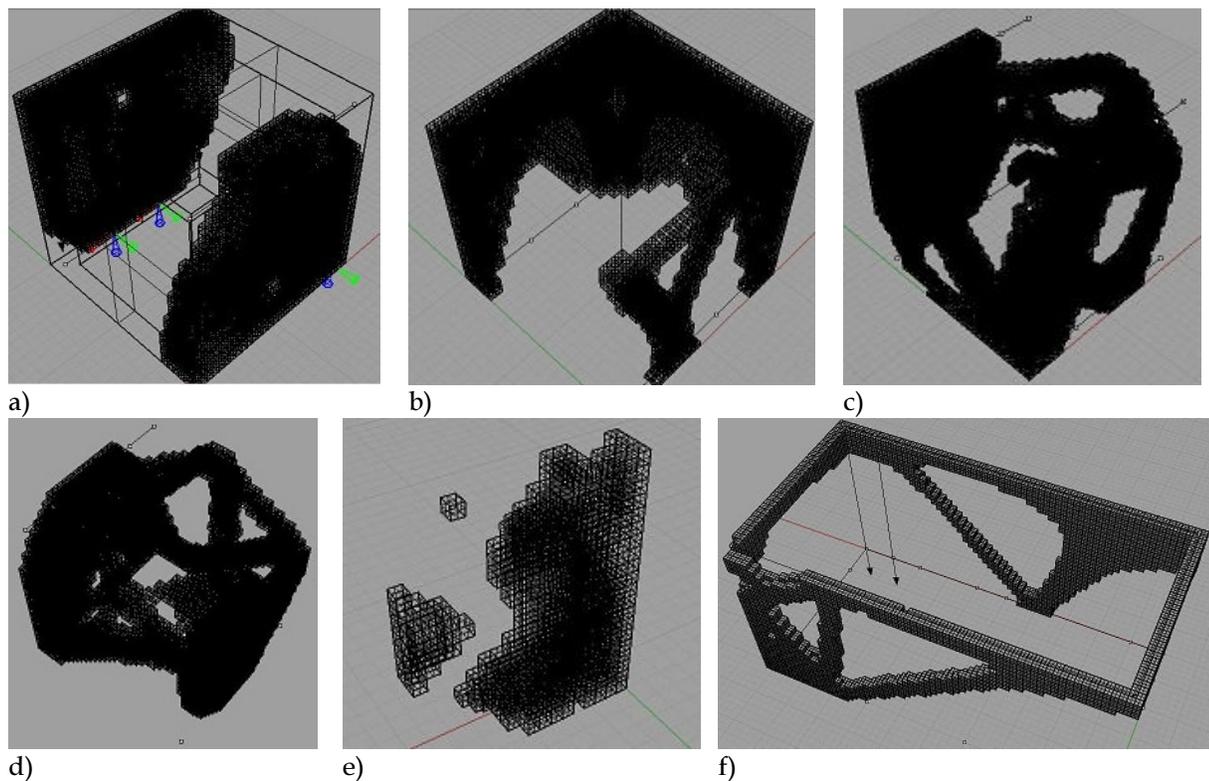
Quadro 7.13 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 4, Aula 3)

Categoria física			
Segmento 1 (19h)		Segmento 2 (19h40)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
F-d	Desenha no Rhino 3D prisma de base retangular, semelhante a um cubo (representando volume edifício)	F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada
F-m	Subtrai volume do interior no Rhino 3D	F-d	Esboça à mão possíveis variações na forma (Figura 7.11a)
F-p	Copia e cola forma no Rhino 3D	F-p	Copia forma 1
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-d	Desenha Rhino 3D novos pontos, vetores das cargas e locais dos apoios
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.10d)
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.10a)	F-d	Desenha Rhino 3D prima de base retangular, semelhante uma parede para teste a forma numa parede
F-d	Copia no Rhino forma	F-d	Desenha Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.10e)
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-d	Esboça à mão possíveis variações sobre a forma
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.10b)	F-d	Desenha no papel retângulo com as medidas do prisma de base retangular testado no BESO
F-p	Copia no Rhino forma	F-d	Desenha linhas correspondentes a paredes, portas, vazios, etc. (esboço de planta edifício)
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios do volume	F-d	Repete desenhos em outros pavimentos
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-m	Risca por cima, apaga e redesenha linhas definindo espaços, aberturas, etc. (Figura 7.10e)
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.10c)		
F-d	Desenha no Rhino 3D prisma de base retangular		
F-d	Desenha Rhino 3D novos pontos, vetores das cargas e locais dos apoios		
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma		

Segmento 3 (20h20)		Segmento 4 (21h)	
F-d	Desenha no Rhino 3D prima de base retangular (representando estrutura de praça externa)	F-d	Desenha Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada	F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.10f)
F-d	Desenha no Rhino 3D prima de base retangular (representando volume edifício)	F-p	Copia no Rhino forma
F-m	Subtrai volume do interior (deixa apenas quatro paredes)	F-d	Desenha Rhino 3D novos pontos, vetores das cargas e locais dos apoios
F-p	Copia e cola no Rhino forma	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
		F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada

Fonte: Autoria própria

Figura 7.10 Figuras geradas no BESO por meio de prismas de bases retangulares (Equipe 4, Aula 3)

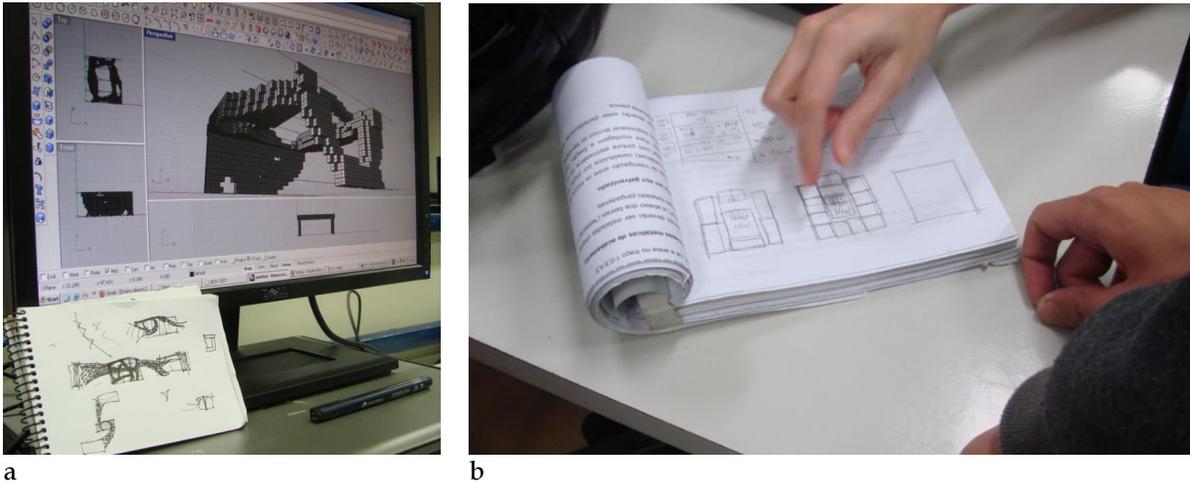


Fonte: Elaborado pela Equipe 4 (Caroline Fernandes, Christine Reinesch, Débora Monteiro, Mônica Bovi, Gabriel Vaschetta)

Mostra-se, na Figura 7.11, que o processo de projeto utilizou procedimentos automatizados de geração da forma, por meio do software BESO 3D (para Rhinoceros),

intercalado pelo uso de esboços e croquis, que serviam como meio de reflexão, discussão e auxiliavam na alteração das diretrizes que regiam a geração da forma (a forma inicial, os materiais usados, as forças, as restrições, etc.)

Figura 7.11 Processo de projeto intercalando atividades automatizadas (a) e manuais (b)



Fonte: autoria própria

Os segmentos 1 e 2 das categorias de ações perceptuais visaram observar e compreender como se dava o processo de geração da forma no BESO 3D (para Rhinoceros). Nos segmentos 3 e 4, a ênfase foi na análise das experimentações, comparando formas e explorando novas possibilidades formais.

Durante o processo de projeto, discutiam-se as formas geradas entre os membros da equipe e avaliavam se elas seriam factíveis de serem utilizadas no projeto. Testavam e confrontavam as questões de forma e função durante todos os segmentos, por meio do uso de esboços, croquis e geração automática da forma no BESO 3D (para Rhinoceros). Em algumas situações, partiu-se da planta para definir a forma básica; em outras, do volume.

No processo de geração da forma, fizeram-se várias avaliações nos modelos gerados, identificando preferências formais e metas de organização espacial. A principal ação conceitual foi a de avaliação das formas geradas em todos os seguimentos. Com as avaliações, definiram-se metas conceituais, que ajudavam os novos processos de geração da forma.

Como diretriz de projeto, a Equipe 2 estabeleceu na Aula 1 que o novo edifício deveria ser verticalizado. Assim, as formas testadas eram volumes prismáticos verticais e ocós. Ao longo

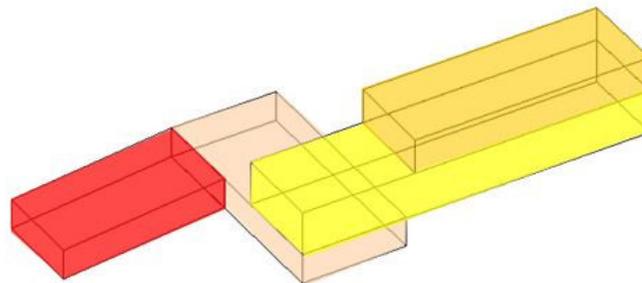
do experimento, definiu-se que as formas geradas seriam usadas como o invólucro do edifício. Definiu-se também que a circulação vertical deveria ser projetada em uma torre localizada próxima de uma grande abertura da fachada e os pavimentos deveriam apresentar formas irregulares, de modo que fossem criados átrios, como espaço de convívio. A forma final do novo edifício foi gerada em atividade extraclasse; foi concebida como variação da forma representada na Figura 7.19, gerada em aula.

7.3.3.3 Equipe E5

Após a definição da forma do novo edifício na Aula 1, a Equipe 5 reuniu-se e a desenhou no SketchUp (Figura 7.12). Na Aula 2, essa forma foi exportada para o Rhinoceros e redesenhada.

A proposta estabelecida pela equipe foi explorar o método BESO para criação do volume do novo edifício. Nesse caso, diferentemente dos outros dois trabalhos, iniciou-se com uma forma geométrica básica, já definida na Aula 1. Depois de diversas experimentações nessa forma, gerou-se a volumetria do novo edifício.

Figura 7.12 Volumetria do edifício definida na Aula 1



Nota: Auditório - vermelho; lobby e café - rosa; secretaria e salas de aula - amarelo; sala professores, reunião, almofarifado e xérox - bege

Fonte: Elaborado pela Equipe 5 (Ana Luísa Naressi, Cristiane Sasazawa, Henrique Rizzi, Nathaje Costa, Olivia Siviero)

A primeira experiência realizada na Aula 3 (segmento 1), foi a geração de uma forma retangular para testar como o método interfere no processo de geração da forma (Quadro 7.14). No segmento 1, essa volumetria foi desenhada no Rhinoceros. No seguimento 2, as propriedades da forma foram configuradas e a forma foi testada, mas ocorreram erros. Outros testes se realizaram até se chegar a uma forma que pudesse ser lida pelo BESO 3D (para

Rhinoceros). Nos segmentos 3 e 4, geraram-se diversas formas, que foram discutidas pela equipe e reformuladas até se chegar à forma final.

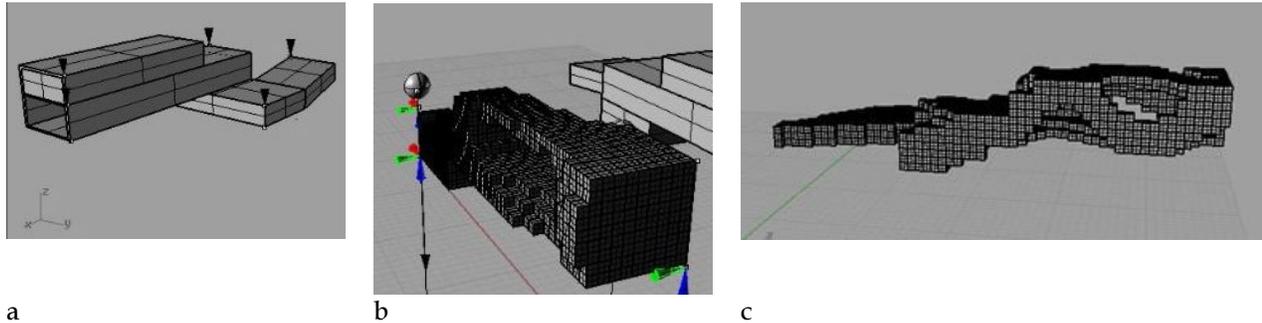
Quadro 7.14 Segmentos dos protocolos visuais para a categoria de ação física (Equipe 5, aula 3)

Categoria física			
Segmento 1 (19h40)		Segmento 2 (20h10)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
F-d	Desenha no Rhino 3D prisma de base retangular (representando parte do volume do edifício principal)	F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.
F-d	Desenha no Rhino 3D pontos, vetores das cargas e locais dos apoios	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-v	Visualiza no BESO mensagem de erro (forma não gerada)
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-d	Redesenha forma no Rhino 3D - transforma todas as superfícies em volume.
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada	F-m	Subtrai material do interior do volume no Rhino 3D
F-d	Desenha no Rhino 3D os volumes correspondentes à forma do edifício definida na aula de 9 de setembro (Figura 7.13a)	F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.
		F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
		F-v	Visualiza no BESO mensagem de erro
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h10)	
F-d	Redesenha forma no Rhino 3D - transformar todas as superfícies em volume.	F-d	Redesenha forma no Rhino 3D - simplifica a forma
F-m	Subtrai material do interior do volume no Rhino 3D	F-m	Subtrai material do interior do volume no Rhino 3D
F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-g	Configura propriedades da forma - tipos de material, iterações, novo volume, etc.
F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada	F-v	Visualiza forma gerada (Figura 7.13b)
F-p	Copia e cola no Rhino forma	F-d	Redesenhar forma no Rhino 3D - torna a forma mais próxima da desejada
F-g	Configura propriedades da forma no BESO- tipo de material, iterações, novo volume, etc.	F-m	Subtrai material do interior do volume no Rhino 3D
F-i	Ativar comando do BESO para gerar forma	F-g	Configura propriedades da forma no BESO - tipo de material, iterações, novo volume, etc.
F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada	F-i	Ativa comando do BESO para gerar forma
		F-v	Visualiza no Rhino 3D forma gerada (Figura 7.13c)

Fonte: Autoria própria

A Figura 7.13 mostra algumas das experimentações realizadas no BESO 3D (para Rhinoceros) durante a Aula 3. Na figura é possível ver a posição das cargas. Na Figura b é possível visualizar (em cores) as restrições (apoios).

Figura 7.13 Formas geradas no BESO na aula de 23 de setembro de 2011



Fonte: Elaborado pela Equipe 5 (Ana Luísa Naressi, Cristiane Sasazawa, Henrique Rizzi, Nathaje Costa, Olivia Siviero)

O processo de projeto na Aula 3 constituiu-se de testes, geração de forma e especulação dos efeitos do BESO 3D (para Rhinoceros) na geração da forma. Definidas as formas, os resultados eram discutidos e conjecturavam-se novas possíveis relações formais para a pele do edifício. Durante esse processo, os alunos (projetistas) interagiam com um ambiente digital que gerava uma representação digital e era visualizada no Rhinoceros.

Depois de geradas as formas no BESO, estudaram-se questões formais e funcionais. Do ponto de vista formal, avaliaram se as formas geradas atendiam aos critérios estéticos definidos pela equipe. Do ponto de vista funcional, verificou-se se as aberturas geradas na fachada eram suficientes para atender às necessidades do programa arquitetônico do edifício (segmento 4). Durante o segmento 2, não ocorreram avaliações funcionais das propostas, pois nessa fase não foram geradas novas formas. As cargas e os apoios foram pensados no início do exercício, o que se realizou em função da melhor distribuição funcional e da locação do novo edifício no terreno.

As principais discussões referentes às categorias de ações conceituais, durante os 4 segmentos, eram principalmente sobre a avaliação da forma gerada no BESO 3D (para Rhinoceros) e discussões sobre metas de melhoria da forma visando atender aos anseios da equipe.

A Aula 1 foi de extrema importância para a definição da volumetria do novo edifício. Na Aula 3, desenvolveu-se um processo de otimização da forma, por meio da geração de uma

superfície complexa, criada com base no desempenho estrutural e funcional. Esse processo determinou o partido arquitetônico do novo edifício, com seus cheios e vazios. Diferentemente do ocorrido nas outras duas equipes, nesse caso, empregou-se a geometria básica definida nos estudos conceituais da Aula 1 para a geração da forma final do edifício.

7.3.3.4 Análises comparativas dos protocolos

Ao comparar os protocolos visuais para as categorias de ações físicas das equipes, observou-se que as Equipes 2 e 4 estabeleceram uma quantidade bem maior de tarefas, comparadas com a Equipe 5, durante os segmentos 1 e 2 (Quadro 7.15). As ações projetuais foram mais intensas nesses dois segmentos iniciais em virtude dessas duas equipes tentarem explorar uma quantidade maior de soluções, comparadas com a Equipe 5, que partia de uma volumetria básica, já definida na Aula 1. No Segmento 3 e 4, ocorreu uma inversão; a Equipe 5 realizou uma quantidade maior de tarefas de geração da forma, que visava integrar questões de forma e função.

Quadro 7.15 Número e categorias físicas das tarefas realizadas em cada Segmento na Aula 3

Segmento	Aula 3										Total				
	S1			S2			S3			S4		Segmentos			
Equipe	E2	E4	E5	E2	E4	E5	E2	E4	E5	E2	E4	E5	E2	E4	E5
Desenhar (F-d)	4	7	3	6	8	1	4	2	1		2	2	14	19	7
Movimentar (F-t)	4	1		3	1					2			9	2	
Modificar (F-m)						1		1	1		1	2		2	4
Copiar (F-p)	1	2			1			1	1				1	4	1
Configurar (F-g)	3	2	1	3		2	2	1	2	2	1	2	10	4	7
Implementar (F-i)	3	4	1	3	2	2	2	1	2	2	1	2	10	8	7
Visualizar (F-v)	3	3	1	3	3	2	1	1	2	3	1	2	10	8	7
TOTAL	15	19	6	18	15	8	9	7	9	9	6	10	54	47	33

Fonte: Autoria própria

Na categoria física de ações cognitivas, a principal tarefa realizada pelas Equipes 2 e 4 foi desenhar (Quadro 7.15). A Equipe 5, por partir de uma volumetria básica já definida, apresentou um número relativamente baixo dessa tarefa, comparado com as outras equipes. Entre as tarefas mais realizadas, destacam-se a de configurar, implementar e visualizar a representação digital (Quadro 7.15). Esses dados indicam um intenso processo de geração da forma usando o meio digital.

Na Aula 3 as equipes também usaram estratégias diferentes de geração da forma. Sem uma definição clara de partido ou geometria inicial, a Equipe 2 procurou explorar diferentes possibilidades formais. Depois de várias experimentações, partiu para gerar uma forma por meio de uma geometria básica. A forma gerada partiu de um volume parcialmente maciço, definindo não apenas a volumetria, mas também a configuração de alguns espaços internos do Café.

As Equipes 4 e 5 optaram por usar o BESO para a geração de um invólucro no edifício. A Equipe 5 partiu de uma volumetria previamente definida e, por meio de diversas implementações na forma, chegou-se ao volume ensejado. A Equipe 4 fez experimentação de formas diferentes e organizações espaciais variadas. A volumetria a ser usada no BESO foi definida apenas na Aula 3, depois de testar diferentes formas geométricas.

7.3.4 Processos de projeto: Geometria e forças

7.3.4.1 Geometria

A forma inicial dos projetos de todas as três equipes foi uma geometria básica (Quadro 7.16). Porém, as categorias geométricas usadas foram diferentes entre as Equipes 2, 4 e 5. Enquanto as duas primeiras equipes usaram um processo de encontrar a forma, a Equipe 5 usou uma solução híbrida. Partiu de uma forma predefinida na Aula 1, constituída por uma geometria matemática básica. Por essa forma, iniciou o processo de encontrar o melhor desempenho estrutural para o edifício.

Quadro 7.16 Forma inicial e categorias geométricas usadas na geração da forma

Projeto	Forma Inicial	Categorias geométricas usadas na geração da forma
Equipe 2	Geometria básica	Encontrar a forma
Equipe 4	Geometria básica	Encontrar a forma
Equipe 5	Geometria básica	Híbrida (geometria matemática básica + encontrar a forma)

Fonte: Autoria própria

7.3.4.2 Forças

Os principais critérios de desempenho utilizados como forças que guiaram a geração da forma foram: estrutura e programa (Quadro 7.17). As Equipes 2 e 4, por partirem de uma forma ainda bem desvinculada do programa, utilizaram a estrutura como principal força aplicada na geração da forma. Durante o desenvolvimento do projeto, a Equipe 4 começou a estabelecer um zoneamento do edifício e isso implicou a aplicação das cargas em função de alguns aspectos programáticos; mas isso ocorreu num estágio mais avançado do processo de geração da forma. A Equipe 5, desde o início, já partiu de uma volumetria inicial do edifício. Essa geometria foi criada de um zoneamento que surgiu do programa arquitetônico. Nesse caso, a carga estrutural foi uma força que agiu diretamente na estrutura, e o programa aparece também como uma força importante estabelecendo as restrições de volumetria.

Quadro 7.17 Número de iterações e principais forças usadas na geração da forma

Projeto	Número de iterações	Forças	
		Estrutura	Programa
Equipe 2	139	X	
Equipe 4	79	X	x
Equipe 5	45	X	X

Fonte: Autoria própria

O número de iterações usadas no BESO para geração da forma, que deu origem à geometria do edifício, também variou entre cada equipe. O projeto da Equipe 5 realizou 45 iterações, o que mostra que a forma passou uma quantidade de menores ciclos, até se chegar à solução mais bem otimizada de estrutura, quando comparado com o projeto da Equipe 2. O projeto da Equipe 2, por sua vez, partiu de um volume “semissólido” (com pequenas subtrações no volume). Logo, foi necessário mais iterações até se chegar a uma estrutura otimizada.

7.3.5 Processos de projeto: técnicas e softwares

7.3.5.1 Técnicas

As principais técnicas digitais usadas pelas equipes foram idênticas (Quadro 7.18). A única técnica diferente foi usada pela Equipe 5 para confecção de protótipo por meio do modelo

digital desenhado no SketchUp. Como a FEA estava acoplada ao BESO, essa técnica foi utilizada dentro do mecanismo interno do BESO 3D (para Rhinoceros), sem a necessidade de interação com a técnica.

Quadro 7.18 Principais técnicas digitais usadas durante a geração da forma

Técnicas	Equipe		
Confecção de maquete virtual 3D	Equipe 2	Equipe 4	Equipe 5
FEA	Equipe 2	Equipe 4	Equipe 5
BESO	Equipe 2	Equipe 4	Equipe 5
Propotipagem			Equipe 5

Fonte: Autoria própria

7.3.5.2 Softwares

As três equipes usaram os mesmos softwares (Quadro 7.19). O modo de empregar e o estágio do processo de geração da forma variaram em cada equipe. A condição básica para o uso dos softwares foi em função do domínio da equipe no manuseio.

Quadro 7.19 Softwares usados pelas equipes durante o processo de geração da forma digital

Software	Equipe		
AutoCAD	Equipe 2	Equipe 4	Equipe 5
SketchUp	Equipe 2	Equipe 4	Equipe 5
Rhinoceros	Equipe 2	Equipe 4	Equipe 5
BESO 3D para Rhinoceros	Equipe 2	Equipe 4	Equipe 5

Fonte: Autoria própria

A Equipe 5, por exemplo, iniciou usando o SketchUp para desenhar a volumetria básica (ver Figura 7.12). Em seguida, exportou para o Rhinoceros. Realizou o processo de geração da forma usando o BESO. A forma resultante foi exportada para o SketchUp novamente. Como essa forma era constituída por uma série de cubinhos (os elementos finitos), então se criou uma nova forma no SketchUp seguindo os modelos da forma vinda do Rhinoceros. Por fim, exportou-se para o AutoCAD. Nesse último software, desenharam-se as plantas, cortes e fachadas.

As Equipes 2 e 4, por partirem de formas muito elementares, criaram os primeiros modelos 3D já no Rhinoceros. A partir daí, o processo foi semelhante ao da Equipe 5. Por conta

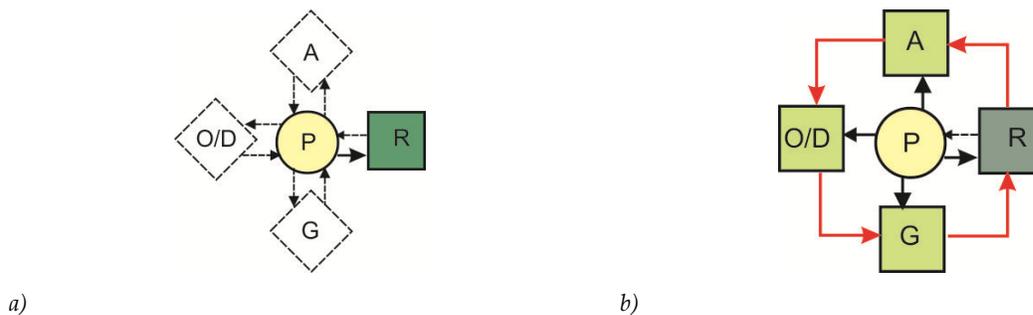
de dificuldades de importar e exportar arquivos de formatos diferentes, todas as equipes tiveram de, em algum momento, reconstruir os modelos 3D para serem usados por outras ferramentas.

7.3.6 Processos de projeto: modelo digital e nível de automatização

7.3.6.1 Equipe E2

O processo de geração da forma usada pela Equipe 2 constituiu-se de duas principais classes de interação e relação dos projetistas e componentes do projeto digital (Figura 7.14). A primeira classe ocorreu com a criação de um modelo 3D para ser usado pelo BESO durante o processo de geração da forma. A segunda classe ocorreu com a implementação do método BESO. Nesse caso, o processo de geração da forma era completamente automatizado. Com as formas geradas, os estudantes da Equipe 2 alteravam a geometria da forma inicial ou os parâmetros e novamente implementava o método BESO para a geração da forma.

Figura 7.14 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma pela Equipe 2



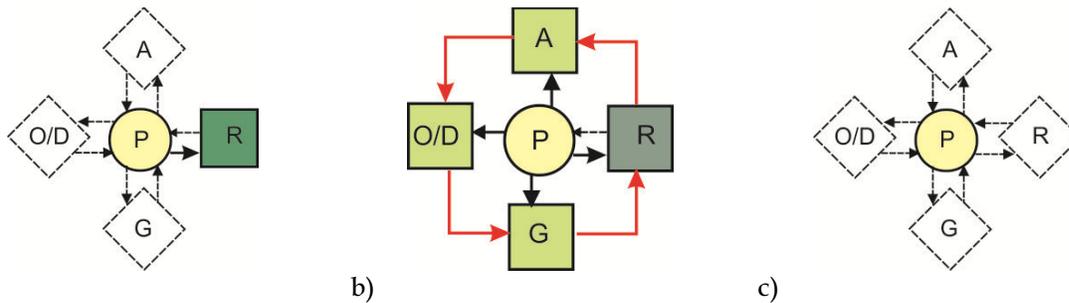
Fonte: Autoria própria

7.3.6.2 Equipe E4

A Equipe 4 usou para a geração da forma três principais classes de interação e relação dos projetistas e componentes do projeto digital (Figura 7.15). A primeira classe ocorreu com a criação de um modelo 3D para ser usado pelo BESO durante o processo de geração da forma. A segunda classe ocorreu com a implementação do método BESO. Nesse caso, o processo de

geração da forma era completamente automatizado. Com as formas geradas, a Equipe 4 realizava croquis visando adaptar a forma gerada a certas condições do programa e à estética desejada (ver Figura 7.11). Esses croquis representavam a terceira classe. Eles permitiam à equipe elucidar certas relações. Novamente eram geradas novas formas iniciais ou os parâmetros eram alterados. Por fim, implementava-se o método BESO para a geração de nova forma.

Figura 7.15 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma pela Equipe 4



a)

b)

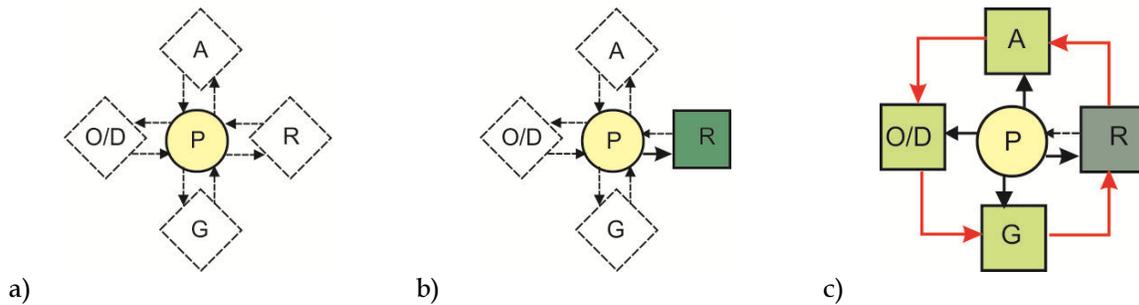
c)

Fonte: Autoria própria

7.3.6.3 Equipe E5

O processo de geração da forma usada pela Equipe 5 também empregou três classes de interação e relação dos projetistas e componentes do projeto digital (Figura 7.15), mas numa ordem diferente da usada pela Equipe 4. A primeira classe já ocorreu na Aula 1 com a definição da volumetria inicial do edifício (Figura 7.16a). Nessa aula, a equipe fez esboços, realizou estudos de massa com pedacinhos de papel dimensionados com as áreas do novo edifício e ensaiou uma volumetria inicial com massa de modelar. Definida essa forma, a equipe criou um modelo geométrico 3D no SketchUp, ocorrido na segunda classe (Figura 7.16b). Esse modelo foi exportado para o Rhinoceros e, na terceira classe, foi implementado o método BESO, gerando as formas do edifício (Figura 7.16c). Nesse caso, o processo de geração da forma era completamente automatizado. Definidas as formas, as equipes estudavam-nas, alteravam parâmetros e restrições e geravam novas formas. Esse processo ocorreu algumas vezes até se chegar à forma definitiva.

Figura 7.16 Modelos simbólicos de projeto digital utilizados na geração da forma pela Equipe 5



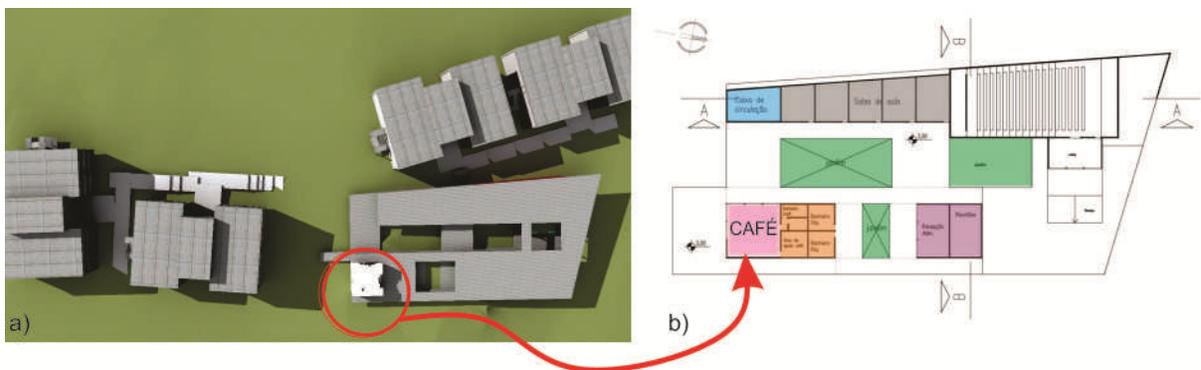
Fonte: Autoria própria

7.3.7 Análise dos produtos

7.3.7.1 Equipe E2

A Equipe 2 definiu na Aula 1 que a Pós-Graduação, a Área Coletiva e o Café da Faculdade de Ciências Médicas da Unicamp deveriam estar distribuídas em um único edifício, com linhas horizontais. O elemento principal, o Café, apareceria como uma extensão do edifício novo. A proposta apresentada conseguiu contemplar esses conceitos no novo edifício. O resultado é que o bloco do Café (destacado em branco, Figura 7.17 e Figura 7.18) contrasta com a construção horizontal do novo edifício e se destaca pelo uso de uma forma inusitada, desenvolvida no software BESO 3D (para Rhinoceros) (Figura 7.17).

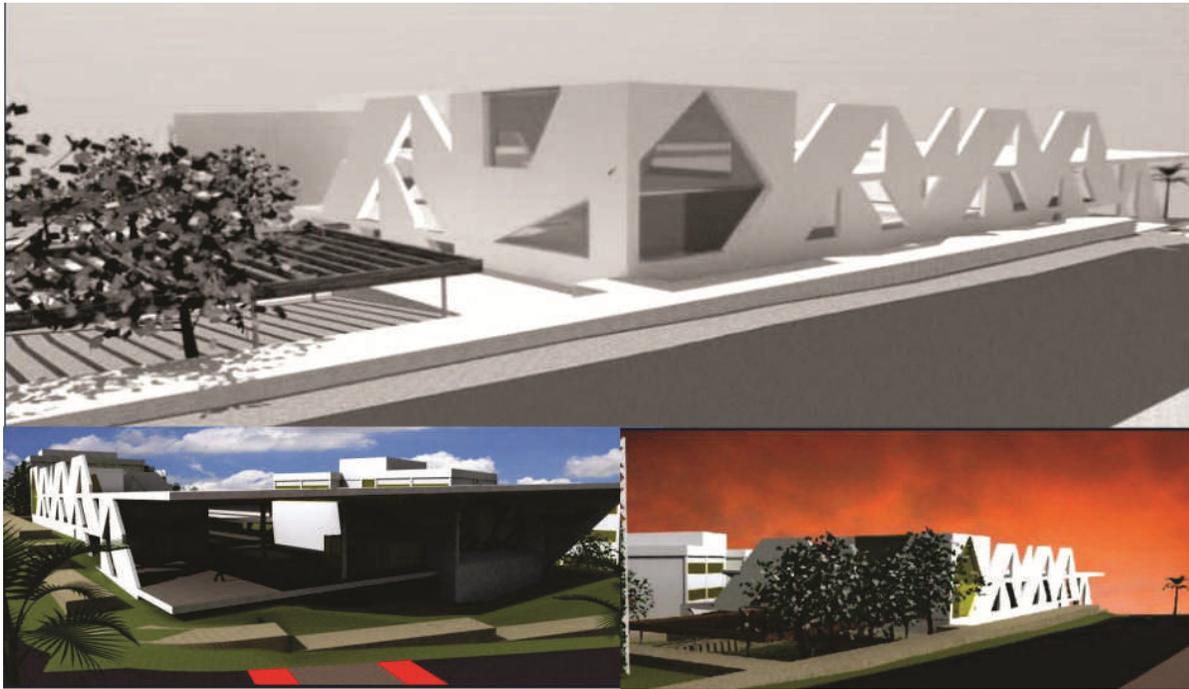
Figura 7.17 Proposta final de implantação conjunto, com destaque para volume branco do café (Equipe 2).



Fonte: Elaborado pela Equipe 2 (Andrea Destefani, David Elsinger, Karla Baldasso, Sarah Martins e Sofia Belledonne)

Ao analisar o processo de projeto, ficou evidente que as ações projetuais realizadas nas Aulas 1 e 3 guiaram o pensamento e resultaram nas decisões de projeto. Os conceitos definidos na Aula 1 podem ser visíveis na solução apresentada no partido arquitetônico. O uso do Método BESO não mudou os conceitos do projeto, e, ao mesmo tempo, permitiu explorar novas soluções estruturalmente eficientes e formalmente inovadoras (Figura 7.18a,c).

Figura 7.18 Perspectivas do novo bloco proposto e volume do café em destaque (Equipe 2)



Fonte: Elaborado pela Equipe 2 (Andrea Destefani, David Elsinger, Karla Baldasso, Sarah Martins e Sofia Belledonne)

O uso do BESO se, por um lado, limitou o universo de possibilidades formais, por outro, diversificou as possibilidades estéticas geradas durante as atividades de projeto. A exploração da forma motivada pelo uso do Método BESO impulsionou nessa proposta a discussão sobre a forma do edifício, como integrar essa forma às demais partes do edifício e ao entorno. Questões relacionadas com a funcionalidade e o dimensionamento foram consideradas secundárias durante a geração da forma do Café.

O material (que compõe a estrutura) e as forças (cargas e apoios) foram os elementos propulsores da geração da forma do Café, portanto, antecedentes da forma. Embora a busca da forma fosse a meta principal do projeto (do café), o material e as condições estruturais guiaram o processo de morfogênese, o que indica que a forma não foi gerada casualmente.

Depois de gerada a forma do café, as demais partes do novo edifício foram projetadas. O café, nesse caso, apareceu como uma extensão do novo edifício. O resultado indica uma configuração formal díspar entre a forma do café e do novo edifício. Essa diferenciação, embora não seja razão direta do uso de distintos modelos de projeto (modelo Performativo, usado no Projeto do Café e modelo CAD descritivo, usado nas demais partes do edifício), foi influenciada pelo uso desses distintos métodos. Por outro lado, essa solução mostrou que é possível integrar distintos métodos de geração da forma no projeto de único edifício. As notas atribuídas pelos especialistas para o partido arquitetônico (Quadro 7.20) indicam que, mesmo que se utilizem métodos distintos na geração do edifício, o projeto apresentou uma nota satisfatória, a qual ficou acima da média (7), apesar de ter sido uma experiência nova e desafiante para a equipe.

Quadro 7.20 Média das notas dos juízes para a proposta apresentada pela Equipe 2

Avaliador	Ident. V.	Quali. F.	Dim.	Exequi.	Quali. E.	Contex.	E. BESO	Média
Av1	9,0	6,6	8,0	6,0	9,0	8,3	9,0	8,2
Av2	6,0	9,0	8,0	4,0	6,0	8,0	7,0	6,8
Av3	5,0	8,0	8,0	8,0	7,0	5,0	7,0	6,9
Av4	9,0	9,0	8,0	8,0	7,0	9,0	7,0	8,1
Av5	8,0	6,0	5,0	7,0	8,0	8,0	7,0	7,0
Média	7,4	7,7	7,4	6,6	7,4	7,6	7,4	7,4

Fonte: Autorial própria

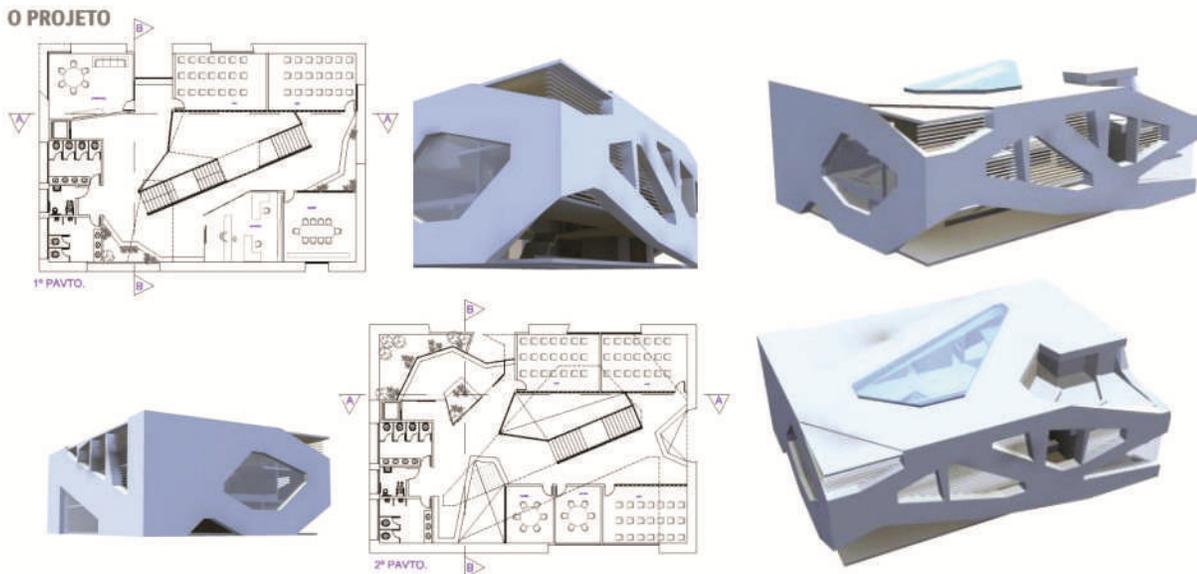
7.3.7.2 Equipe E4

Conforme se definiu na Aula 1, a solução da Equipe 4 privilegiou a construção de um edifício verticalizado, centralizando todas as funções e se destacando dos demais blocos pré-fabricados. Esse edifício foi concebido com um volume puro, uma fachada de forma inusitada, gerada por meio de um processo evolutivo, baseada no uso do método BESO, como impulsionador da forma. O desempenho estrutural e, secundariamente, o programa foram os motores da geração da forma. No final, chegou-se a uma volumetria, com um jogo rico de cheios e vazios e estruturalmente eficiente.

Após escolhida a volumetria inicial, a equipe implementou melhorias graduais até se chegar ao volume final do edifício. A Figura 7.19 mostra a intenção da equipe em trabalhar o volume gerado no BESO como um invólucro de projeto. Por outro lado, o espaço interior poderia ter sido mais explorado, criando uma dinâmica mais rica que pudesse integrar melhor a

complexidade da pele com a dinâmica do espaço interno. Se externamente a forma gerada no BESO possibilitou uma volumetria dinâmica, ricamente articulada, internamente, o espaço permaneceu monótono, estático e padronizado, contrastando drasticamente com o invólucro, que parece descolar-se do edifício (Figura 7.19b, e).

Figura 7.19 Formas geradas no BESO foram usadas como invólucro do edifício (Equipe 4)



Fonte: Elaborado pela Equipe 4 (Caroline Fernandes, Christine Reinesch, Débora Monteiro, Mônica Bovi, Gabriel Vaschetta)

Do ponto de vista da implantação, o que se observa é que a Equipe 4 explorou pouco as relações espaciais entre interno e externo. Foram pouco exploradas as tentativas de estabelecer uma estrutura espacial que pudesse articular os blocos utilizando o Método BESO. Na implantação final, o edifício aparece como um bloco que se destaca do conjunto. As praças, os caminhos e áreas de convívio não foram estudados nessa proposta.

A proposta apresentada pela Equipe 4 destaca-se pela exploração exaustiva da forma invólucro no BESO. Por meio de vários testes, foi possível chegar a uma forma de invólucro de edifício que, ao mesmo tempo, era estruturalmente eficiente e permitiu estabelecer uma dinâmica rica de cheios e vazios, favorecendo uma espacialidade interna. Essa espacialidade, todavia, não foi alcançada, pois a equipe preferiu intervir internamente com uma estrutura ortogonal, simétrica e modulada, bem diferente da riqueza da forma do invólucro.

A média das notas dos especialistas indica que a qualidade estética da proposta aparece como uma das notas mais altas (Quadro 7.21). Essa qualidade estética estava motivada pela

volumetria criada no BESO. Questões relacionadas com a unidade do conjunto, a funcionalidade e a contextualização tiveram notas inferiores. Essas outras notas indicam que a exploração do método BESO para a geração da forma do entorno apareceu como um processo pouco articulado com o projeto das demais partes do edifício. O uso do BESO para a geração da forma do invólucro, embora apareça como uma estratégia promissora, precisa estar integrado a outros métodos que resgatem a forma gerada no BESO.

Quadro 7.21 Média das notas dos juízes para a proposta apresentada pela Equipe 4

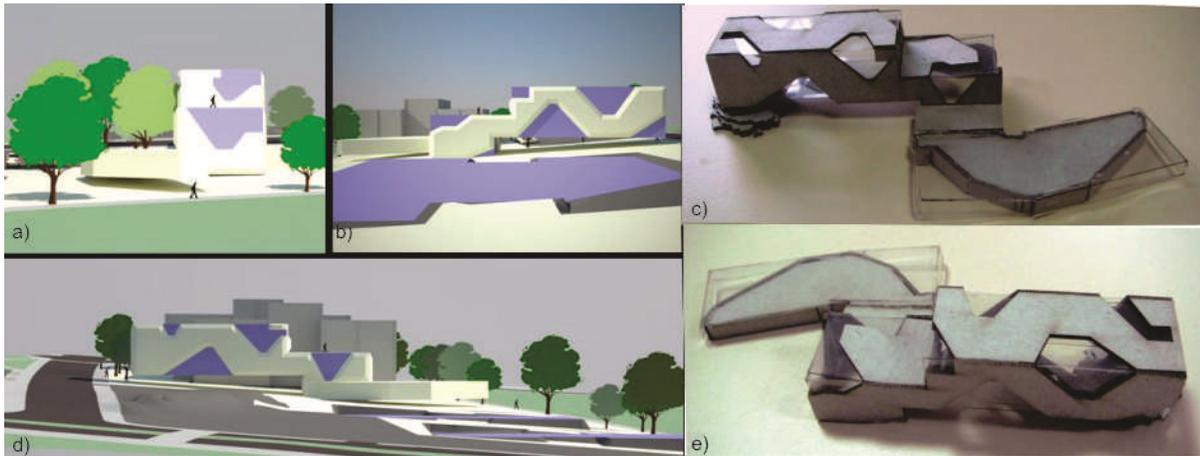
Avaliador	Ident. V.	Quali. F.	Dim.	Exequi.	Quali. E.	Contex.	E. BESO	Média
Av1	9,0	9,0	8,0	6,6	9,0	6,6	9,0	8,2
Av2	4,0	5,0	7,0	2,0	4,0	2,0	5,0	4,1
Av3	6,0	6,5	6,5	8,0	7,0	8,0	8,0	7,1
Av4	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,0	8,0	7,8
Av5	7,0	6,0	6,0	7,0	8,0	5,0	8,0	6,7
Média	6,8	6,9	7,1	6,3	7,2	5,7	7,6	6,8

Fonte: Aatoria própria

7.3.7.3 Equipe E5

Definida uma geometria básica que pudesse abrigar o programa arquitetônico do novo edifício na Aula 1, a Equipe 5, na Aula 3, implementou um processo morfogenético, visando gerar uma forma arquitetônica e um invólucro guiado pelo desempenho estrutural. A experimentação utilizando o software BESO 3D (para Rhinoceros) permitiu explorar diversas possibilidades formais, levando em consideração as cargas, os apoios (já que esse projeto apresenta várias áreas em balanço) e o programa arquitetônico (Figura 7.20a,b).

Figura 7.20 Proposta da forma do novo edifício



Fonte: Elaborado pela Equipe 5 (Ana Luísa Naressi, Cristiane Sasazawa, Henrique Rizzi, Nathaje Costa, Olivia Siviero)

O resultado é uma forma bastante dinâmica, que, além de marcar o acesso principal, sobressai no terreno, destacando-se dos demais edifícios e se integrando à paisagem, acompanhando as curvas de nível (Figura 7.21a, b). Se o uso do BESO permitiu explorar formalmente o edifício, a equipe deixa de explorar as potencialidades espaciais quando realizou o leiaute interno (Figura 7.21c, d). O resultado é que a planta, um tanto quanto estática, gerou espaços pouco dinâmicos e, em alguns casos, superdimensionados. As avaliações pelos especialistas confirmam esse aspecto (Quadro 7.22). Elas mostram que as notas relacionadas com a funcionalidade e o dimensionamento foram mais baixas. Já as notas relacionadas com a qualidade espacial foram maiores e se destacam das demais.

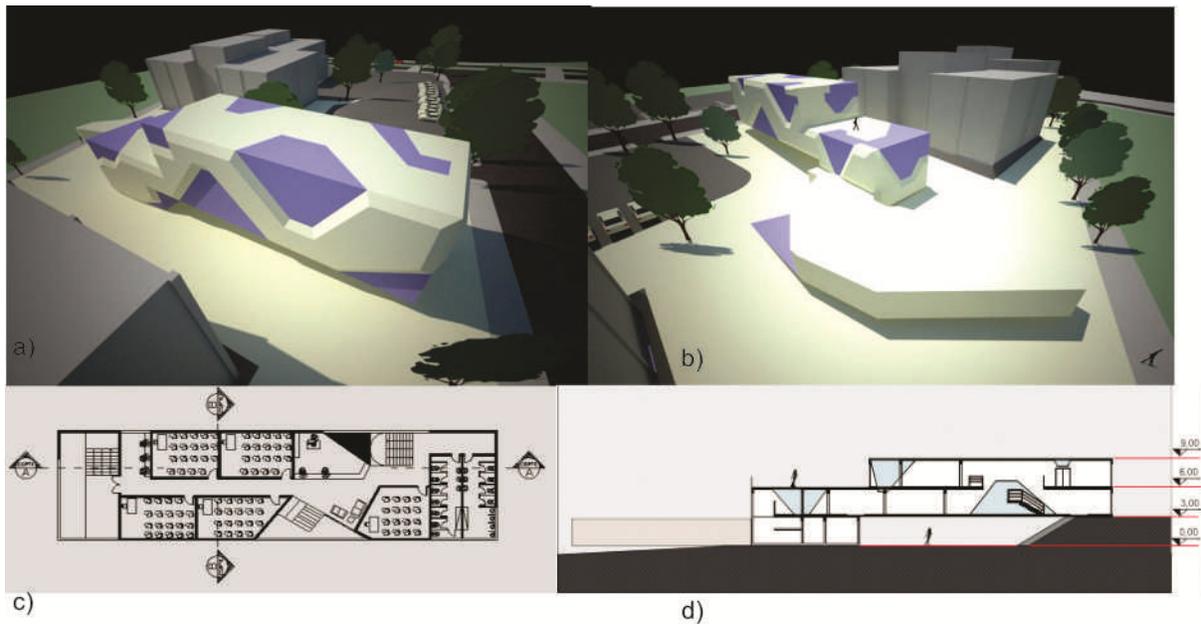
A distribuição espacial dos blocos pré-fabricados, agrupados dois a dois e dispostos nas duas extremidades do terreno, fez destacar o espaço central do lote, o que permitiu valorizar o novo edifício. Para resolver o problema do estacionamento, criou-se uma área na periferia do edifício, permitindo atender ao número de vagas, sem a necessidade de criação de um edifício garagem (Figura 7.22a, b).

Quadro 7.22 Média das notas dos juízes para a proposta apresentada pela Equipe 5

Avaliador	Ident. V.	Quali. F.	Dim.	Exequi.	Quali. E.	Contex.	E. BESO	Média
Av1	6,6	6,0	6,6	6,6	6,6	6,6	9,0	6,8
Av2	8,0	3,0	5,0	6,0	8,0	6,0	7,0	6,1
Av3	9,0	6,0	7,0	8,0	9,0	8,0	9,0	8,0
Av4	9,0	9,0	9,0	8,0	9,0	7,0	9,0	8,5
Av5	8,0	6,0	6,0	8,0	9,0	8,0	9,0	7,7
Média	7,9	6,0	6,5	7,3	8,3	7,1	8,6	7,5

Fonte: Autoria própria

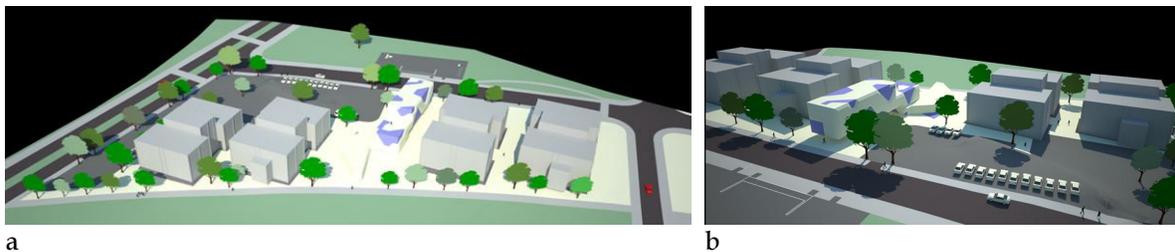
Figura 7.21 Vista do novo edifício e sua articulação com demais blocos



Fonte: Elaborado pela Equipe 5 (Ana Luísa Naressi, Cristiane Sasazawa, Henrique Rizzi, Nathaje Costa, Olivia Siviero)

Um dos pontos mais positivos nesse experimento foi explorar o BESO em favor de uma distribuição espacial definida anteriormente pelo zoneamento. A exploração formal utilizando o BESO, baseada numa geometria básica predefinida, permitiu gerar diversas opções de configurações formais, coerentes com a proposta conceitual. Ao mesmo tempo, a forma resultante gerou-se com base no desempenho estrutural e levou em consideração o programa arquitetônico. Esses condicionantes foram os motores da geração da forma.

Figura 7.22 Proposta de implantação com destaque para novo edifício com forma gerada no BESO



Fonte: Elaborado pela Equipe 5 (Ana Luísa Naressi, Cristiane Sasazawa, Henrique Rizzi, Nathaje Costa, Olivia Siviero)

7.4 Interpretações, Análises e Descobertas

7.4.1 Análise dos resultados das ações cognitivas e segmentações

Ao comparar o número de tarefas realizadas por segmento na Aula 1 com a Aula 3, observou-se que em todos os experimentos a quantidade de tarefas da categoria de ação física por segmento foi sempre maior na Aula 3 (Quadro 7.23). A Aula 1 apresentou uma média de 40% do número de tarefas da Aula 3. Isso significa que na Aula 3 as ações físicas de projeto foram muito mais intensas que na Aula 1.

Quadro 7.23 Número de tarefas realizadas em cada segmento (S) das aulas 1 e 3, por equipe (E)

segmento equipe	Aula 1				Total	Aula 3				Total
	S1	S2	S3	S4		S1	S2	S3	S4	
E2	4	6	8	6	24	19	18	9	9	55
E4	1	4	3	3	11	19	15	7	8	49
E5	4	5	8	4	21	6	8	9	10	33
Média	9	15	19	13	56	44	41	25	27	137

Fonte: Autoria própria

A natureza do problema na Aula 1 foi diferente da Aula 3. Na Aula 1, definiram-se os principais conceitos que norteariam a proposta. Nessa aula, muitas discussões ocorreram. A Aula 3 constituiu-se pelo desenvolvimento e experimentação de um partido arquitetônico, conceituado na Aula 1. A Aula 3, pela sua natureza, destinada à criação do partido arquitetônico, implicou ações mais intensas de geração da forma, com criação de opções formais que, até então, não eram imaginadas pelos alunos.

Em razão das formas geradas pelos alunos partirem de um desempenho estrutural, foi possível chegar a formas eficientes sobre esse aspecto. Questões programáticas também foram consideradas na geração da forma do novo edifício proposto pela Equipe 5. A utilização do método BESO, ao mesmo tempo em que manteve uma quantidade intensa de tarefas físicas, o que demonstra um processo ativo de tomada de decisões, permitiu explorar eficientemente a forma, utilizando o desempenho como propulsor da morfogênese.

7.4.2 Ações cognitivas dominantes

7.4.2.1 Tempo de Tarefas

Nas primeiras tentativas de utilização do BESO, o tempo gasto para a realização das tarefas foi grande, o que se justifica porque a quantidade de tarefas que resultava na geração da forma era menor no segmento 1 que no 4. Em muitos casos, as tarefas não eram completadas no segmento 1, gerando erros. Com a familiarização pelas equipes do software, reduziu-se o tempo na definição dos parâmetros e geração da forma. Com isso, foi possível encurtar o intervalo de tempo e gerar diversas opções formais (nos segmentos 3 e 4 da Aula 3). Os segmentos dos protocolos visuais das categorias físicas demonstram que, ao longo do tempo, as formas passam a ser geradas corretamente. O número de formas geradas também foi grande. A equipe 4, por exemplo, gerou mais de dez opções formais durante a Aula 3.

7.4.2.2 Domínio no Uso das Ferramentas

Como pôde ser observado no Quadro 7.3, apesar do conhecimento limitado, pelo menos um aluno de cada grupo tinha habilidade básica no uso do software Rhinoceros. Durante a Aula 2, apresentaram-se os principais comandos do BESO 3D (para Rhinoceros) e mostrou-se como gerar as formas. Desse modo os alunos tiveram uma noção básica e suficiente para a realização das experimentações.

O principal problema detectado no uso do ferramental esteve relacionado com seu potencial limitado em iniciar a otimização visando o desempenho estrutural de uma forma gerada de uma geometria complexa. Problemas relacionados com a habilidade em manuseio do Rhinoceros também foram expressos por algumas equipes. Nas situações em que apenas um aluno sabia manipular o Rhinoceros, a solução utilizada para desenhar era construir o modelo 3D em outro software e exportar para o Rhinoceros. Problemas de interoperabilidade em algumas situações foram detectados exigindo a reconstrução do modelo no Rhinoceros.

7.4.2.3 Número de Soluções Apresentadas

Por meio de uma geometria básica, viu-se que o uso do BESO 3D (para Rhinoceros) permitiu gerar uma grande variedade de soluções num curto intervalo de tempo, possibilitando expandir o espaço de soluções. Essas soluções, em alguns casos, foram usadas como partido arquitetônico. Na Equipe 2, a forma gerada no BESO também influenciou na morfologia da forma não gerada no BESO, o que mostra como esse método permite ampliar as possibilidades formais da solução.

7.4.2.4 Reação ao Uso do Método

Embora as formas geradas sejam complexas, a morfologia inicial precisa ser simples, o que limita o potencial criativo. Mesmo assim, as reações dos alunos quanto ao uso do método foram bastante positivas. À pergunta sobre a reação ao uso do método, as respostas foram as seguintes: a Equipe 2 respondeu que contribuiu com o processo criativo; a Equipe 4 disse que muda o processo de projeto, valorizando as decisões formais; e a Equipe 5 respondeu que, apesar de necessitar de conhecimentos especializados no Rhinoceros, ele permitiu a exploração de novas possibilidades formais do edifício.

7.4.3 Análise das avaliações dos produtos

O que se pôde observar em todos os casos é que as notas dos quesitos formais foram maiores de que outros quesitos. Questões ligadas ao dimensionamento dos espaços e à funcionalidade do edifício foram consideradas secundárias nessa fase. Isso não significou, por outro lado, uma simples preocupação formalista das soluções geradas, mas mostrou que o método, ao valorizar o material, a estrutura e a forma, gera soluções que exploram mais intensamente esses aspetos do projeto.

Durante o desenvolvimento do projeto, outros desempenhos deverão ser considerados, transformando alguns aspectos do partido arquitetônico. Esses resultados mostram que o uso do BESO, por enfatizar o desempenho estrutural em vez da qualidade da hierarquia dos espaços,

por exemplo, indica que tem um melhor resultado se usado em programas arquitetônicos sem muita complexidade funcional.

Mesmo que se considere a estrutura como propulsora da geração da forma, pelos resultados positivos da avaliação formal, pôde-se conjecturar que o uso dele estimulou a geração da forma de modo criativo. Essa afirmação pode ser comprovada com a resposta dos alunos sobre o interesse em utilizar o BESO em outras experiências de projeto. As Equipes 2 e 4 se mostraram interessadas em continuar usando o método, pois, segundo os participantes, gera formas interessantes por meio da distribuição de cargas. A Equipe 5 disse que talvez tenha interesse, dependendo da evolução do método em geração de forma por geometrias complexas.

Outro aspecto interessante observado nos projetos é que cada uma das equipes utilizou procedimentos diferentes para geração da forma. A Equipe 2 partiu de exercícios formais abstratos para definir a geometria de uma parte do edifício. A forma do resultado desse exercício influenciou a outra parte da edificação. A Equipe 4 partiu da transformação de uma volumetria pura, no BESO, para definir a distribuição do programa do novo edifício. A Equipe 5 iniciou de uma forma que reflete a distribuição do programa, para se chegar ao partido arquitetônico desejado.

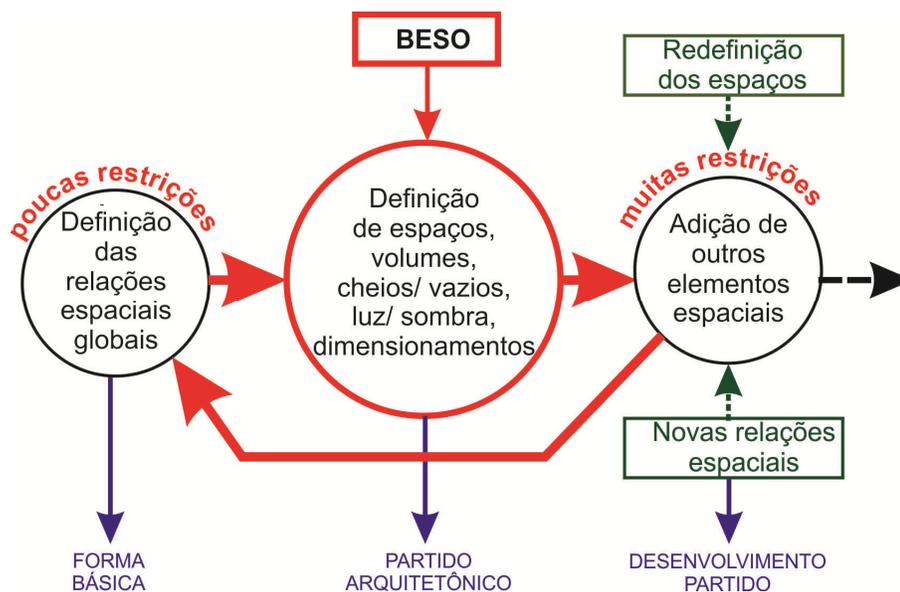
7.5 Considerações Finais

7.5.1 Os resultados da experiência

Os resultados da experiência mostram que a utilização do Método Performativo BESO, apoiado no uso da ferramenta BESO 3D (para Rhinoceros), em atelier de projeto de cursos de arquitetura e urbanismo foi proveitosa, possibilitando testar diferentes soluções formais de projeto. As experiências foram capazes de resultar em soluções de projetos, variadas e ricas, do ponto de vista da volumetria e do jogo de cheios e vazios. Além do mais, eram eficientes do ponto de vista estrutural.

O processo de projeto iniciou-se com a definição das relações espaciais globais (Figura 7.23), que resultou na escolha da geometria básica (forma básica). O estágio seguinte consistiu em usar a ferramenta BESO3D para geração da forma baseada no desempenho estrutural. O uso do BESO3D nesse estágio uniu a solução estrutural, que foi resolvida de uma maneira eficiente, com as restrições do programa expressas no zoneamento. Passada essa fase, em que o projetista interagiu com as partes operativas de um mecanismo que gera a forma digital, ocorreu o desenvolvimento do partido arquitetônico. Nesse momento, o projetista agiu diretamente na forma que foi gerada; dialogando com a mesma. O partido arquitetônico, então, era amadurecido e conduzido para a etapa de desenvolvimento do projeto ou era retornado para redefinição das relações espaciais globais, e o processo era reiniciado (ver Figura 7.3). É interessante, também, observar que durante o processo de projeto ocorreu um crescimento no número de restrições.

Figura 7.23 Processo de concepção da forma usando o BESO



Fonte: Autoria própria

Os resultados mostram que a experiência com o método BESO na geração da forma permitiu: criar um número considerável de soluções de projeto, dentro de um espaço de soluções; utilizar facilmente o ferramental (mesmo que não se conhecesse alguns conceitos relacionados com o comportamento da estrutura, a experimentação foi fácil de realizar); possibilitar a realização de um número grande de ações cognitivas, num curto intervalo de

tempo; valorizar a exploração formal (escala, proporção, identidade visual, relação cheios e vazios, etc.); valorizar o desempenho estrutural como motor de geração da forma do edifício.

Para confirmar a segunda hipótese desta pesquisa restava verificar se o método empregado apresentava efetivamente as características do Modelo Performativo apresentada na Estrutura Conceitual proposta por este trabalho.

O que se observou é que essa experiência foi caracterizada por um processo de projeto digital definido pelo uso de sequências de decisão completamente automatizadas, intercaladas por sequências manuais. Nesse método, as implementações no BESO constituem-se pelos estágios completamente automatizados. Esboços, croquis à mão livre e desenhos no computador representam as sequências analógicas. Além do mais, o método implementado era topológico e evolutivo (duas características dos modelos performativos).

Práticas colaborativas e a interoperabilidade também ocorreram, porém em um nível abstrato. A ausência do uso explícito de práticas colaborativas, que é um dos pressupostos do Modelo Performativo, só foi possível em razão de o método estar associado ao emprego de uma ferramenta computacional (BESO3D para Rhinoceros), que, em virtude de seus mecanismos internos, possibilitou realizar sofisticadas análises estruturais, a partir de poucos dados de entrada. "substituíam-se", portanto, o papel do engenheiro estrutura no diálogo com o arquiteto. Mecanismos internos permitiam dialogar com uma interface gráfica e transformar geometria em informação que fluía entre os mecanismos que realizavam análise, otimização, geração e representação. Tudo isso ocorrendo automaticamente no interior da ferramenta (Figura 7. 24). Dessa maneira, questões de interoperabilidade eram internas ao sistema; e, a função do engenheiro num processo colaborativo era substituída pela fácil interface gráfica da ferramenta, que servia como canal de comunicação com o arquiteto (estudante).

Para sintetizar o que se observa é que o método implementado na experiência didática é: "colaborativo"; compreende no uso simultâneo de técnicas de projeto analógicas e digitais, o que resulta na co-existência de estágios de decisão automatizados intercalados por estágios manuais; baseia-se num projeto topológico, substituindo uma tradição tipológica; tem como pressuposto a interoperabilidade, que está interna ao sistema. Logo, é um método capaz de reproduzir uma estrutura que se assemelha à Estrutura Conceitual de Projeto Performativo apresentado no

Capítulo 6 (Figura 7.25). Portanto, é considerado como um método baseado no Modelo Performativo.

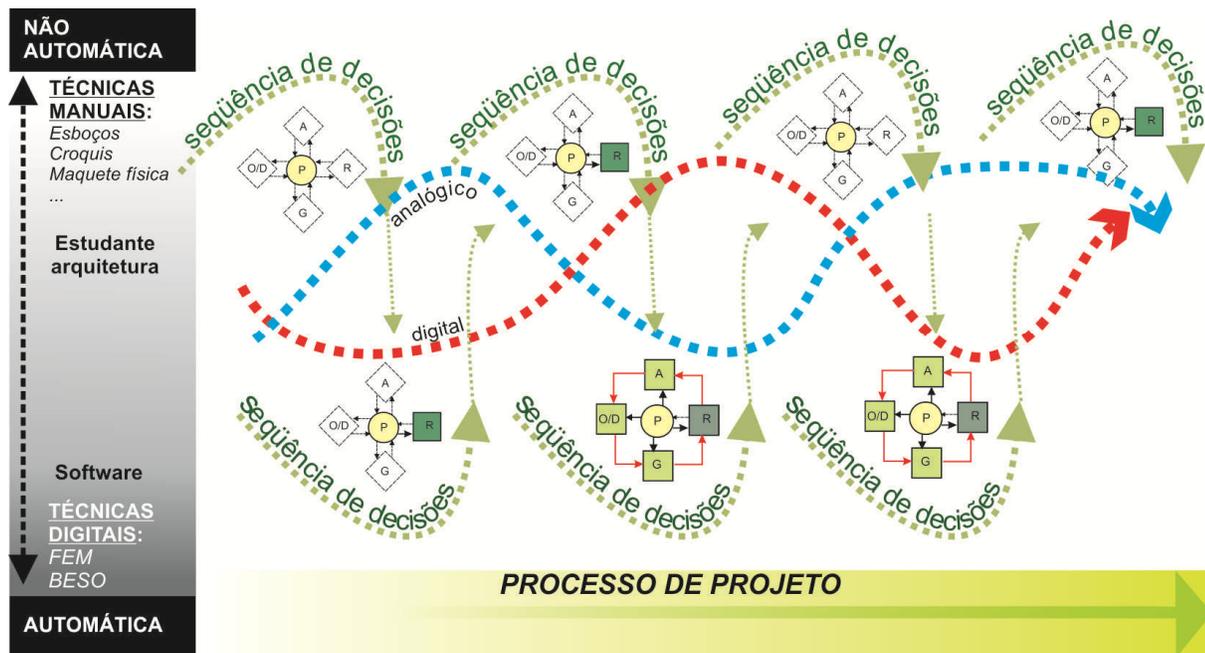
Figura 7. 24 Processo de projeto usando o software BESO3D para Rhinoceros



Nota: Em verde está indicado o mecanismo interno do BESO contemplando os estágios de decisão (avaliação, otimização, geração, representação) de modo automático

Fonte: autoria própria

Figura 7.25 Representação da estrutura conceitual de modelo performativo usado pelos alunos



Fonte: Autoria própria

As experiências de projeto relatadas neste capítulo demonstram portanto que, apesar das limitações e restrições presentes nas práticas de ateliers de projeto do curso de arquitetura e urbanismo, processos de projetos baseados em modelos performativos podem ser aplicáveis eficazmente nesse universo. Seu uso pode estimular a geração da forma de modo criativo e

possibilitar a experimentação de múltiplas possibilidades formais, o que confirma a hipótese levantada no início deste capítulo.

7.5.2 Limitações do método implementado

O principal aspecto limitante para o uso do método BESO foi que, pelo fato de o mecanismo digital (presente na ferramenta BESO3D para Rhinoceros) se restringir a um espaço de solução, que se dava em função da natureza do problema, tratado essencialmente do ponto de vista estrutural; as soluções geradas eram limitadas. Reduzia-se, portanto, as possibilidades de exploração do problema arquitetônico. Logo, embora seja eficiente, o que foi comprovado na experiência didática, é limitado e seu uso se restringe à apenas alguns tipos de solução. Para outras soluções de projeto, são necessários outros métodos de projeto performativos.

7.5.3 Limitações do experimento

Entre as limitações da experiência apresentada neste capítulo estão: a qualidade da amostra, que foi pouco significativa e precisaria ser ampliada para tornar o resultado mais confiável; a falta de confirmação de que as estruturas resultantes são as mais eficientes para aquelas formas; e a não confrontação dos resultados apresentados pelo método BESO com outros que não utilizassem o método.

A amostra discutida nesse experimento é insuficiente para generalizar os resultados apresentados neste trabalho. A limitação dessa amostra indica a necessidade de novas experimentações que abarquem populações mais diversificadas, incluindo estudantes de semestres distintos, de universidades distintas e com distintas experiências no uso e manipulação de softwares na área de arquitetura.

Algumas experiências recentes que comparam o BESO com outros métodos de otimização topológica mostram que o BESO resulta em uma alta qualidade de resolução topológica, com uma excelente eficiência computacional, além de usar um algoritmo fácil de entender e mais simples de implementar (SASAKI, 2005; HUANG; XIE, 2010). Por outro lado, a

realização de testes de eficiência estrutural poderia confirmar a qualidade do método para a geração de formas complexas.

Embora autores como Barber e Hanna (2001) e Lawson (2005) mostrem que o processo de projeto arquitetônico apresenta características comuns, o método de investigação pode indicar variações na maneira como se trata um problema ou se resolve uma solução. O emprego de métodos distintos nem sempre deve ser considerado a melhor maneira para comparar o resultado em uma experiência de projeto arquitetônico. O uso de um determinado método por um projetista pouco experiente pode ser muito eficiente para a resolução de um determinado problema, porém, pode ser insatisfatório para um projetista experiente. Por outro lado, a realização de testes sistemáticos em uma população pode servir como um meio eficiente de validação do método.

8 CONCLUSÕES

8.1 Introdução

Neste trabalho discutiu-se o processo de projeto baseado no desempenho na etapa de concepção arquitetônica. O enfoque foi no estudo do modelo de projeto digital denominado de performativo. Esse modelo foi considerado, neste estudo, como uma instância do projeto baseado no desempenho. Por meio de uma investigação na prática de projeto digital, no contexto da arquitetura performativa, foi possível elucidar os fluxos de informação, as tecnologias necessárias, os novos papéis dos projetistas, o perfil da interação dos projetistas com os componentes do projeto digital, as atribuições profissionais, as habilidades que devem ser requeridas na formação profissional, os conhecimentos e os repertórios necessários para se trabalhar com o modelo de projeto digital denominado Modelo Performativo. A elucidação dessas questões serviu como meio usado para postular uma Estrutura Conceitual do Modelo de Projeto Performativo. Essa estrutura sintetiza e descreve os elementos essenciais do modelo performativo.

Aliada a essa investigação de ordem prática, uma investigação de ordem experimental, apoiada na estrutura conceitual que foi postulada, permitiu propor e experimentar um método baseado no modelo performativo em experiência de projeto, ocorrida em ateliê de um curso de graduação em arquitetura e urbanismo. Os resultados dessas investigações e suas contribuições para o pensamento do projeto digital baseado no desempenho se apresentam e se discutem neste capítulo.

8.2 Validação das Questões Postuladas neste Trabalho

Na introdução deste trabalho, levantaram-se várias questões relacionadas com a prática do projeto performativo. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, essas questões foram respondidas, confirmando ou negando as conjecturas apresentadas no início deste trabalho. Nesta seção apresentam-se e discutem-se algumas dessas questões

A primeira questão diz: "Será que o projeto performativo implica um redirecionamento das ações projetuais dos projetistas, que abdicam, em determinados estágios de tomadas de decisão, de uma interação direta com uma representação do projeto, gerando a forma arquitetônica, para interagir com partes interativas de mecanismos que geram a forma?"

Os estudos de caso e as experimentações em projeto performativo demonstraram que em algumas das sequências de decisão o projetista interagia, sim, com partes operativas de um mecanismo de projeto generativo. Nesse caso, o projetista deixa de interagir diretamente com a representação do projeto que gerava a forma arquitetônica. As representações simbólicas de modelos de projeto digital apresentadas nos estudos de casos evidenciam essa relação entre projetista e componentes do projeto digital. Com isso, a questão é comprovada.

Segundo o entrevistado Al Fisher, mais importante de que a interação com o meio representacional é a definição de um conceito claro e consistente: "[...] o conceito é o ponto principal, não o desenho [...]." Nesse sentido, Fisher afirmou quando abordava o Projeto da Cúpula do Louvre Abu Dhabi: "[...] eu focalizo um conceito, mas eu não o desenho; posso até desenhar algo para expressar o conceito, mas não a forma. A geração da forma é dada pelo sistema, que leva em consideração os critérios de desempenho, por exemplo, os critérios ambientais [...]" (Informação verbal). Nesse caso, fica evidente que mais importante que interagir diretamente com uma representação, o projetista passa a interagir com mecanismos computacionais que geram a forma.

Outra questão abordada dizia: "Os projetistas necessitam mudar suas estruturas cognitivas e incorporar novas habilidades?"

Constatou-se em todos os estudos de caso que se exigia dos projetistas uma capacidade avançada no desenvolvimento de scripts, pelo menos quando utilizavam alguns softwares empregados durante o processo de projeto. Essa constatação demonstra a necessidade dos

projetistas incorporarem novas habilidades em áreas como programação computacional. Essas são áreas do conhecimento que até então não faziam parte da sua formação profissional.

Isso não significa, todavia, que a condição para um profissional trabalhar com um método baseado no modelo performativo seja que ele tenha habilidades computacionais avançadas; mas, sim, que as equipes sejam formadas por profissionais de projeto com essas habilidades. Em algumas situações de projeto, por exemplo, no caso do Rolex Learning Center, os arquitetos do SANAA projetavam por meio da ação direta na manipulação de maquetes. Cabia aos projetistas do Bollinger + Grohmann atuarem na intermediação com o meio digital.

A terceira questão apresentada na introdução era: “Práticas performativas reduzem o poder das ações dos projetistas sobre as decisões projetuais?”

As análises efetuadas nos estudos de caso demonstraram que as práticas performativas não só não reduziram o poder dos projetistas sobre o projeto como permitem que suas ações resultassem em decisões mais coerentes. O conceito do projeto em todos os estudos de caso permaneceu de autoria completa e irrestrita dos projetistas (geralmente do arquiteto). Quando a forma inicial era um partido arquitetônico, como nos projetos do Rolex Learning Center ou da Cobertura do Smithsonian Institution Courtyard Enclosure, a forma final se assemelhava à forma inicial. A diferença estava em ser otimizada para uma situação que fosse exequível construtivamente e ótima em termos de atendimento a certos critérios de desempenho.

O que se observou como prática frequente, típica dos métodos performativos, foi a existência de decisões manuais intercaladas por decisões automatizadas por um sistema computacional. Dessa maneira, era possível que os projetistas (arquitetos e engenheiros) definissem as diretrizes de projeto de acordo com seus anseios, e o sistema aperfeiçoasse, tornando as formas, resultado dessas decisões, mais eficientes, sem, contudo, direcionarem as decisões dos projetistas, que continuavam sendo os autores das decisões.

Nesse sentido, é interessante salientar o que disse Tobias Wallisser em entrevista: “[...] a combinação de regras para gerações automatizadas e decisões manuais eu acho que, em termos de projeto de arquitetura, é a melhor maneira de agir.” (Informação verbal). Sasaki complementa essa questão afirmando que “a forma ideal não pode ser obtida automaticamente pelo uso do computador”, contudo, “o uso combinado com uma interface humana que assuma o papel de

realizar o julgamento em áreas ilógicas, mas existentes em projetos de arquitetura, é essencial" (SASAKI, 2005, p. 81).

A questão seguinte foi: "O desenvolvimento de técnicas digitais, de modo colaborativo, para a geração/ otimização da forma baseada no desempenho pode indicar uma mudança da autoria do projeto, que passa a ser de uma equipe?"

Observou-se nos estudos de casos que os projetos baseavam-se em processos essencialmente colaborativos, desde os primeiros estágios do processo de geração da forma, o que indica uma coparticipação na sua autoria. Em geral, o conceito do projeto partia do arquiteto ou de discussões dele com o cliente. Muitas vezes, o arquiteto iniciava a discussão apresentando um partido arquitetônico que expressava algumas das principais ideias do projeto. Porém, a morfologia final do edifício era resultado de um processo de discussões e amadurecimento de certas ideias, guiadas pelo desempenho. Logo, a autoria passa a ser essencialmente colaborativa.

Essa afirmativa é suportada pelo pensamento de Nicolas Leduc (informação verbal), que compara um processo de projeto mais tradicional com um processo mais colaborativo, que, no caso específico da afirmação citada abaixo, se referia a um projeto que usou o método performativo:

Existem ainda projetos em que os arquitetos são os donos da forma; isso é mais comum, especialmente, quando trabalhamos com estrelas da arquitetura [...] para esses os clientes querem a **marca**. Nesses casos, os arquitetos são realmente poderosos na geração da forma, [...] eles veem com forma preconcebida e durante o processo ele decide entre opções [...], mas existem outros projetos em que ocorre uma real colaboração entre engenheiros e arquitetos. Nessa caso, o processo de geração da forma pode se dar em diferentes níveis, com diferentes padrões de colaboração [...] Quando eu vou a um encontro com um cliente, levo meu notebook e trabalhamos coletivamente na geração da forma [...]. (Nicolas Leduc, RFR)

A quinta questão dizia: "As práticas de projeto baseadas no modelo performativo são viáveis de serem implementadas dentro do estágio tecnológico atual?"

Com base na revisão da literatura e diante dos projetos apresentados nos estudos de caso, não resta dúvida de que o desenvolvimento tecnológico atual é capaz de suportar métodos baseados no Modelo Performativo. Avanços nas tecnologias de modelagem paramétrica nos últimos dez anos e a melhoria da interoperabilidade têm viabilizado a integração de softwares

de representação e de análises, que, muitas vezes, integram-se a ferramentas de otimização da forma.

No caso do Projeto da Cobertura do Smithsonian Institution Courtyard Enclosure, discutido no Capítulo 5, por exemplo, foi possível ver uma completa integração dos softwares de representação, de análise e de otimização durante todo o processo de projeto.

A sexta questão dizia: “A incorporação, já na etapa de concepção arquitetônica, de informações e de conhecimentos vinculados às tecnologias digitais de modelagem paramétrica e à interoperabilidade são condições para práticas digitais baseadas no desempenho?”

Os estudos de caso demonstraram que a resposta a essa questão é sim. A maioria das experiências relatadas neste trabalho realiza-se em estágio de estudo preliminar, durante a concepção da forma arquitetônica (ver Figura 5.2). Por esse motivo, são, em geral, modelos “não tipados”, com um nível de informação não fortemente acoplado ao modelo digital. Conforme se observa, em geral, a informação está acoplada ao software de simulação, e não ao modelo geométrico. Mesmo assim, parâmetros e regras de projeto incorporam informação e conhecimentos à geometria. A boa interoperabilidade entre softwares de representação, análise, simulação e otimização, vinculada a modelos paramétricos consistentes são algumas das condições que possibilitam a morfogênese baseada no desempenho.

A sétima questão dizia: “Essas práticas podem contribuir com a melhoria do desempenho das soluções arquitetônicas?”

Embora não se possa afirmar categoricamente que o modelo performativo melhore a qualidade da solução arquitetônica em sua totalidade, observou-se nos estudos de caso que ele definitivamente melhora alguns dos desempenhos do edifício. Aqueles que são os motores da otimização e/ou geração da forma. Nesse sentido, cabe lembrar Xavier de Kestelier, o qual, em referência ao modelo performativo, disse que “[...] o desempenho definitivamente guia a geração da forma [...]” (informação verbal).

8.3 Validação das Hipóteses da Pesquisa

No Capítulo 1, apresentaram-se duas hipóteses levantadas por esta pesquisa:

- O modelo de projeto digital denominado de Modelo Performativo tem como pressuposto um processo de projeto automatizado, baseado na colaboração, na modelagem paramétrica e na interoperabilidade?
- É possível simular a prática de Projeto Performativo em experiências de atelier de projeto em cursos de graduação em arquitetura e urbanismo, mesmo se sabendo das limitações de conhecimento dos projetistas e do uso de práticas pouco colaborativas?

A primeira hipótese partia de alguns pressupostos que guiavam o projeto performativo. Por meio de uma investigação na prática de projeto digital, no contexto da arquitetura performativa, foi possível identificar os pressupostos do Modelo Performativo e, com isso, responder à questão da hipótese. Cabe discutir a seguir as quatro condições para o projeto performativo mostradas na hipótese.

Esquemas de colaboração entre arquitetos, engenheiros e equipes especializadas em geometria digital eram evidentes em todos estudos de casos. No projeto do Rolex Learning Center, por exemplo, existia uma estreita colaboração não apenas entre arquitetos e engenheiros, mas também entre construtores e fabricantes. No caso do Sidra Trees, a colaboração entre engenheiros e arquitetos era algo marcante, desde a concepção inicial da forma, cada um com responsabilidade nas suas devidas áreas: “[...] o julgamento do valor estético cabia ao arquiteto e o julgamento do valor mecânico ao engenheiro.” (SASAKI, 2005, p. 81). Esses estudos de caso comprovaram que a prática colaborativa no estágio de concepção da forma era condição para o funcionamento do modelo performativo.

Embora seja verdadeiro afirmar que em alguns momentos do processo de projeto existam estágios de decisões automatizados este não é condição do modelo performativo. O que se observou-se na prática é que estágios de decisão automatizados só têm sentido quando coexistem com estágios semiautomatizados e estágios manuais. Essa coexistência é a condição que garante aos projetistas terem um completo domínio da forma durante o processo de projeto. Logo, é falsa a afirmativa da hipótese de que os processos são automatizados. Mas sim, que

apresenta estágios automatizados e/ou semi-automatizados, intercalados por estágios analógicos.

A modelagem paramétrica foi uma técnica presente em todos os estudos de caso. Por meio dessa técnica, os principais parâmetros de projeto podiam ser alterados em função de certos critérios de desempenho, e a geometria era mudada. Mesmo no projeto do Sidra Trees, que se iniciou com um método que não usava a modelagem paramétrica, no estágio mais avançado da concepção da forma, foi necessária a parametrização da geometria de modo a possibilitar o uso de mecanismos de otimização da forma.

A interoperabilidade foi vista também como um aspecto condicional dos métodos baseados no modelo performativo. A interoperabilidade era o meio que permitia a passagem de informações entre diferentes aplicativos computacionais usados nas fases de representação, avaliação, otimização/desempenho e geração da forma arquitetônica. Graças à interoperabilidade, era possível definir padrões de comunicação de dados capazes de serem lidos diretamente entre esses diferentes softwares. Graças à interoperabilidade, era possível estabelecer sequências de decisões semiautomatizadas e automatizadas, e tornar o processo de otimização/geração da forma usando o meio digital algo efetivo.

Observou-se que, embora existisse boa interoperabilidade em algumas partes do processo de projeto, em muitos dos estudos de caso, existiam problemas de interoperabilidade entre algumas fases, por exemplo, entre projeto e fabricação. Isso exigiu, em certas situações, a reconstrução do modelo digital, como foi o caso do projeto do Rolex Learning Center. Por outro lado, na etapa de concepção, a boa interoperabilidade garantia a morfogênese guiada por critérios de desempenho.

Nos estudos de caso, também se observou que, em geral, procurava-se usar uma única plataforma de softwares, tornando as trocas mais fáceis. Essa foi a estratégia usada, por exemplo, no projeto da cúpula do Museu Louvre Abu Dhabi. Em algumas situações, os projetistas desenvolviam scripts ou programas de computador que rodavam vinculados a outros softwares, muitas vezes, de representação, servindo para implementar técnicas de avaliação e otimização. Desse modo, o fluxo da informação era mais liso, sem perda.

As observações feitas acima levam à confirmação parcial da hipótese; um dos pressupostos considerados como condição do modelo performativo foi comprovado ser

parcialmente verdade. Esse se referia à existência das sequências de decisão automatizadas como condição do modelo performativo.

No Capítulo 7, realizou-se uma pesquisa experimental que visava responder à segunda hipótese desta pesquisa. Por meio da aplicação do método BESO desenvolveu-se uma experimentação em ateliê de projeto de curso de arquitetura e urbanismo que levou a soluções originadas por um processo de morfogênese guiadas pelo desempenho estrutural. Os resultados do uso do método indicaram para projetos arquitetônicos com soluções criativas e eficientes. Também foi demonstrado no Capítulo 7 que o método desenvolvido é baseado no Modelo Performativo. Logo, foi possível afirmar que o método desenvolvido e aplicado na disciplina de projeto, descrito no Capítulo 7, é uma simulação da prática de projeto performativo, o que comprova a hipótese; e a eleva à categoria de tese.

8.4 Confirmação dos Objetivos da Pesquisa

O objetivo principal da pesquisa, apresentado no Capítulo 1, era: "formular uma Estrutura Conceitual de processo de projeto digital que explique a prática de projeto digital no contexto da Arquitetura Performativa." No Capítulo 6, essa estrutura foi postulada; com ela foi possível explicar os principais elementos que caracterizam o Modelo Performativo.

Além do objetivo geral, definiram-se alguns objetivos específicos. O primeiro objetivo era: "Caracterizar a prática do projeto digital baseado em desempenho de acordo com as categorias de ações (processos) e decisões (sínteses) empregadas nos processos de projeto." O Capítulo 5 realizou esse objetivo ao definir uma série de categorias de ação e decisão que foram usadas para identificar e caracterizar a prática de projeto performativo.

O segundo objetivo específico era: "Identificar métodos, técnicas e ferramentas empregados na prática de projeto performativo". O estudo exaustivo das práticas de projeto performativo, realizado no Capítulo 5, permitiu identificar alguns dos principais métodos, técnicas e ferramentas computacionais usados em projetos performativos. Foi possível reconhecer as técnicas recorrentes em práticas performativas, como modelagem paramétrica,

Análise de Elemento Finito e Scripting, e técnicas que são mais específicas, geralmente vinculadas ao uso de certos métodos, por exemplo, análise sensitiva.

O terceiro e quarto objetivos específicos eram: “Categorizar os Modelos Performativos abordados nos estudos de caso; identificar e caracterizar os principais componentes desses modelos.” Após os estudos de caso, iniciou-se uma investigação que comparou e classificou métodos baseados nos modelos performativos de acordo com suas similaridades e diferenças. Essa empreitada resultou numa classificação taxonômica dos modelos performativos (Quadro 5.51 a 5.53). Assim, alcançou-se o terceiro e quartos objetivos específicos deste trabalho.

O quinto objetivo específico era: “Relacionar projeto performativo e Building Information Modeling”. Os estudos de caso deram os indícios necessários para que no capítulo seguinte fosse demonstrado que o *Building Information Modeling*, como processo, era condição essencial para a prática de projeto performativo.

O sexto e o sétimo objetivos específicos eram respectivamente: “propor estrutura conceitual de modelo de projeto performativo; posicioná-los perante outros modelos de projetos digitais baseados no desempenho.” Com base numa investigação na prática de projeto digital, no contexto da arquitetura performativa empreendida no Capítulo 5 e destrinchada no Capítulo 6, foi possível elucidar o modelo performativo e descrevê-lo numa estrutura conceitual. Esses dois capítulos, também, compararam o modelo performativo com outros modelos baseados no desempenho, alguns dos quais convivendo com o modelo performativo em um mesmo processo de projeto. Essas discussões elucidaram esses objetivos.

O oitavo e nono objetivos específicos foram: “validar modelo teórico proposto por meio de sua aplicação; testar a exequibilidade por meio de método simplificado, em experiência de atelier de projeto.” A formulação e da aplicação de um método performativo denominado BESO em ateliê de projeto permitiu realizar os dois últimos objetivos deste trabalho.

8.5 Resultados

Uma das grandes críticas ao uso do computador no processo de projeto se baseia numa visão que diz que ele pode limitar o processo criativo (STEELE, 2001; LAWSON, 2004). As

experiências apresentadas neste trabalho demonstraram não só o potencial do computador no processo criativo, mas também que ele pode ser considerado como uma ferramenta essencial de transformação da prática arquitetônica em busca de soluções calcadas na melhoria do desempenho da arquitetura, que visem a eficiência energética, a economia dos meios e a sustentabilidade.

Os resultados deste trabalho relacionam-se com a compreensão dos fundamentos que regem o modelo performativo. Esses resultados são de duas ordens: a primeira de ordem teórica e a segunda de ordem experimental. Esses resultados se associam às hipóteses levantadas neste trabalho.

8.5.1 Resultados da estrutura conceitual

Por meio de uma **estrutura conceitual** de projeto performativo foi possível:

- Caracterizar o modelo performativo como baseado em prática essencialmente colaborativa durante a síntese arquitetônica (entre arquitetos e engenheiros estruturais); uso simultâneo de técnicas de projeto manuais e técnicas automatizadas (técnicas manuais, associadas à ação do arquiteto e automatizadas à do engenheiro); processo evolutivo (iniciar o processo de projeto com poucas restrições e progressivamente aumentar as restrições); coexistência de múltiplos estágios de decisão (manuais, semiautomatizados ou automatizados); fluxo de informação analógico e digital; *Building Information Modeling*; processo de projeto topológico substituindo a tradição tipológica.
- Mostrar a possibilidade da inversão do processo de geração da forma de uma sequência *Top/ Down*, para um processo *Botton/ Up*: a forma pode surgir da organização das partes e não da predefinição do todo. Por meio das propriedades intrínsecas do material, critérios de desempenho podem guiar a formação da estrutura e definir a forma (o todo). A aplicação de técnicas como tecelagem, dobradura ou formação a métodos performativos permitem essa inversão. Com isso a exploração da forma deixa de ser o meio para se chegar à arquitetura e passa a ser o resultado de

uma aplicação de critérios de desempenho do material aplicado à determinada técnica.

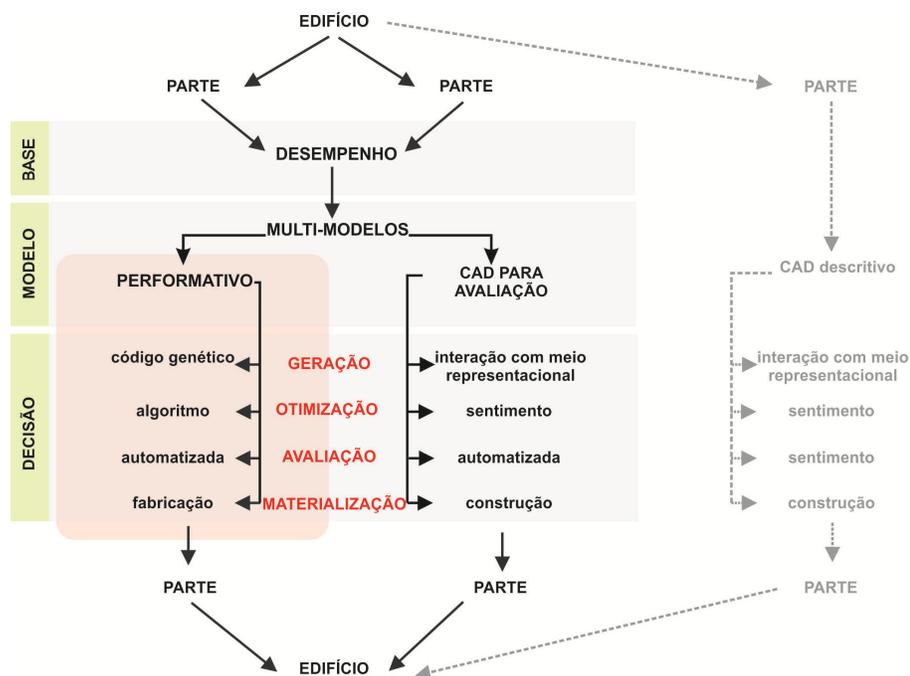
- Identificar a coexistência em um mesmo processo de projeto de métodos baseados no modelo performativo com métodos baseados em outros modelos de projeto digital (muitas vezes, também baseados no desempenho, como os Modelos CAD para Avaliação). Essa coexistência de diferentes modelos e métodos permite resolver problemas complexos de projeto, abrigar e pacificar a controversa relação forma X função.

A seguir, discute-se mais detalhadamente o terceiro tópico apresentado acima.

Destrinchando os projetos realizados sob a égide do modelo performativo, foi possível identificar a coexistência, em um mesmo processo de projeto, de modelos performativos com outros modelos de projeto digital. Esses coparticipam do processo de projeto e, ocasionalmente, são também guiados pelo conceito de desempenho, muitas vezes, associado à sustentabilidade e à eficiência dos meios. Esses empregam distintos métodos e são usados para o desenvolvimento do projeto de outras partes do edifício (Figura 8.1). Essa coexistência de diferentes modelos e métodos permite resolver problemas complexos de projeto, abrigar e pacificar a controversa relação forma X função. Forma e função emergem simultaneamente, assim como é simultâneo o uso de distintos métodos.

A forma aparece associada à matéria, ao invólucro, às partes e sua relação com o todo e à tectônica arquitetônica. A função se associa ao espaço, ao vazio delimitado pela forma, que é ocupado pelo ser humano e tem um uso específico. A forma se associa à morfogênese digital. Essa última se deriva de um processo generativo, baseado no desempenho. Um processo em que dados de desempenho guiam os estágios evolucionários da forma. Nesse processo, o material e a estrutura antecedem à forma, definindo-a por meio de uma estrutura que envolve profunda colaboração entre engenheiros e arquitetos e que se baseiam na matemática, na geometria, na lógica formal, que é guiado pelo desempenho. A forma gerada delimita o espaço e estabelece uma função que foi definida com base no desempenho.

Figura 8.1 A coexistência de diferentes modelos de projeto digital durante o processo de projeto de um edifício



Fonte: Autoria própria

A função, geralmente representada em uma série de metas e restrições, tem uma profunda relação com a forma do edifício e se baseia no contexto. A função, ao se associar ao espaço, e não diretamente à matéria, pode não ter um vínculo direto com a geometria da forma (diferentes formas podem abrigar, de modo eficiente, similares funções). Nesse sentido, o desempenho da função pode ter uma melhor relação com o desempenho do uso do espaço. Portanto, não necessita ter esse vínculo profundo com material, estrutura e forma. Precisa, sim, permitir que o uso para o qual o espaço foi destinado não tenha seu desempenho mingüado em função de sua geometria, sua topologia, suas dimensões, seu conforto e sua segurança.

A coexistência pacífica em complexos projetos digitais baseados no desempenho da relação entre forma e função pode implicar a coparticipação de diferentes métodos e modelos digitais que expressem métodos distintos. Nesse contexto, os Métodos performativos podem ser usados nas partes do projeto caracterizadas por formas mais complexas, que exigem a prevalência de certos desempenhos, cujo clímax está na geração da forma, dentro de uma relação material-estrutura-forma; e os métodos baseados nos modelos de CAD para avaliação podem ser utilizados em outras partes mais convencionais do edifício. Nessas partes,

mecanismos automáticos de avaliação de desempenho do uso dos espaços, previamente concebidos pelos projetistas, podem vislumbrar problemas de projeto e antecipar conflitos, encaminhando para soluções mais eficientes e que melhor atendam às questões de desempenho funcional.

É essa coexistência pacífica entre diferentes métodos e modelos buscando o desempenho do edifício que permite a resolução de complexos problemas de projeto, baseado numa profunda relação entre forma e função, e capaz de resultar em soluções belas esteticamente e eficientes do ponto de vista racional.

A compreensão dessas relações permitiu mostrar que é viável a utilização de modelos múltiplos baseados no desempenho em variadas soluções de projeto. Mesmo em situações particulares, em que algumas das características dos modelos performativos podem estar suplantadas, como foi o caso do método desenvolvido no Capítulo 7, o emprego de certos softwares dentro de um método performativo mostrou-se eficiente apesar das limitações do potencial das soluções.

8.5.2 Resultados da aplicação do modelo performativo em ateliê de projeto

O resultado de ordem experimental esteve relacionado com a aplicação de um método baseado no modelo performativo em experiência de atelier de projeto, de curso de arquitetura e urbanismo. Essa experiência demonstrou que, apesar das limitações e restrições desse universo, este estimula a morfogênese de modo criativo e eficiente. As experiências com o uso do Método BESO para a geração da forma permitiram: criar múltiplas soluções de projeto dentro de um espaço de soluções; utilizar facilmente o ferramental (mesmo que não se conheçam alguns conceitos relacionados com o comportamento da estrutura); possibilitar a realização de um número grande de ações cognitivas num curto intervalo de tempo; realizar novas explorações formais; valorizar o desempenho estrutural como motor de geração da forma do edifício.

8.6 Contribuições e Originalidade

O coração desta pesquisa apoiou-se no estudo do projeto digital baseado no desempenho, na compreensão da importância estratégica do modelo performativo e da utilização de múltiplos modelos de projeto digital, baseados no desempenho; coexistindo durante o processo de projeto. Entre as contribuições deste trabalho, destacam-se:

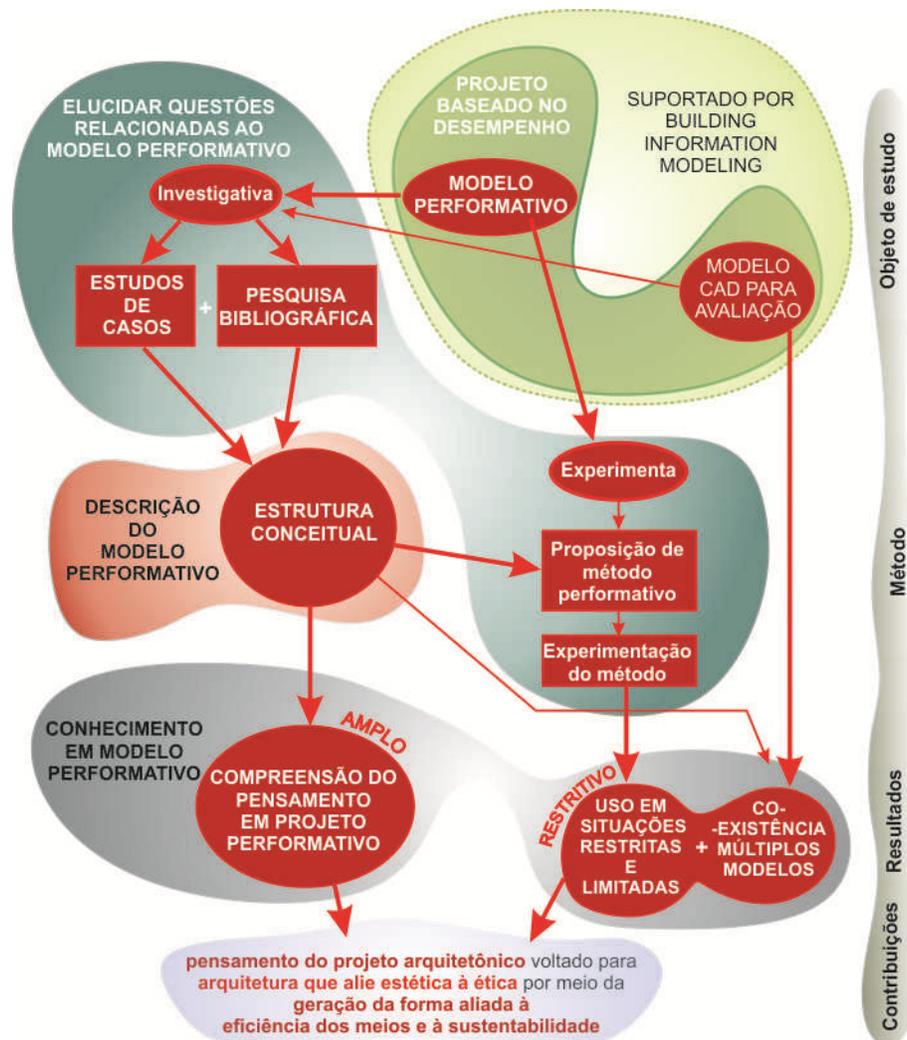
- Criar uma Estrutura Conceitual, que serviu como meio para elucidar o Modelo Performativo e permitiu clarificar a relação entre os projetistas e os componentes do projeto digital, durante as diversas sequências de decisão. Essa estrutura forneceu, também, pistas valiosas para compreender diferenças entre métodos de Projeto Performativos e como esses métodos contribuía para a geração da forma.
- Demonstrar que a aplicação de Modelo Performativo em experiência de ateliê de projeto é viável para ser usado.
- Demonstrar que Projeto Performativo pode aliar a estética à ética por meio da busca de uma arquitetura que seja capaz de atrelar a geração da forma arquitetônica à eficiência energética e à sustentabilidade.

Essa última contribuição é comprovada pelos estudos de caso que mostram que forças como luz natural, acústica, térmica e carga estrutural, entre outros, eram desempenhos que guiavam a geração de uma forma. Questões estéticas estavam intrinsecamente relacionadas com o princípio ético da economia e eficiência, que reflete em soluções que buscam a eficiência energética, a sustentabilidade e a economia.

8.7 Síntese

A Figura 8.2 sintetiza a estrutura deste trabalho. De cima para baixo, destacam-se o objeto de estudo, o método, os resultados e as contribuições.

Figura 8.2 Quadro síntese da pesquisa



Fonte: Autoria própria

O objeto de estudo, que é projeto baseado no desempenho, insere-se nos modelos de projeto digital suportados pelo *Building Information Modeling*. Destacam-se os baseados no desempenho neste trabalho, com enfoque para os modelos performativos. A inquirição procurou elucidar as principais questões relacionadas com o modelo performativo. Isso se deu por meio de um processo investigativo e experimental. O processo investigativo ocorreu por

estudos de caso e pesquisa bibliográfica. Com essa investigação, foi proposta uma Estrutura Conceitual do Modelo Performativo. Essa estrutura descreveu os fundamentos do modelo performativo. O processo experimental se deu pela proposição de método performativo com adaptações na estrutura conceitual e experimentação do método. Os resultados permitiram: ampliar o conhecimento sobre modelos performativos, demonstrar a possibilidade de uso em ateliê de projeto e mostrar que ele coexiste com outros modelos digitais dentro de um processo de projeto. As contribuições são para o pensamento do projeto de arquitetura digital, dentro de um enfoque que alie estética à ética por meio de um processo de geração da forma, que seja guiada pelo desempenho visando a eficiência energética, eficácia dos meios e sustentabilidade.

8.8 Limitações e Dificuldades

As estruturas dos métodos apresentados e discutidos neste trabalho incluíam poucos critérios de desempenho. Discussões mais intensas em projetos performativos baseados em multidesempenho poderiam elucidar melhor a importância do Modelo Performativo para a prática de projeto. Alguns estudos no desenvolvimento de sistemas que abordem o multidesempenho – como o proposto por Alfaris (2009) – poderiam ter elucidado, com mais clareza, como introduzir simultaneamente questões de multidesempenho na geração da forma. Esses caminhos, pouco explorados neste trabalho, poderiam servir como um argumento forte para aqueles que são céticos na prática digital baseada no modelo performativo. Todavia, por ser uma área ainda muito nova e pouco explorada, ainda é muito conceitual, sem respaldo significativo na prática de projeto; por isso, não foi explorada.

8.9 Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho, diversas lacunas surgiram, e não foram resolvidas em razão: da complexidade que poderia resultar dessa resolução; das limitações temporais; limitações de conhecimento dos pesquisadores; e de recursos financeiros. Algumas dessas lacunas podem transformar-se em trabalhos futuros. Entre estes, estão:

1. Aprofundar as análises dos modelos performativos estudados em escritórios, investigando o papel de todos os agentes envolvidos direta ou indiretamente no processo de geração da forma, sejam os projetistas (arquitetos e engenheiros calculistas), sejam consultores (internos ou externos), fabricantes, construtores, clientes, poder público, etc.
2. Refazer o experimento de projeto performativo discutido no Capítulo 7, ampliando a população e a extensão dos testes.
3. Aprofundar as experimentações no método BESO, visando comprovar a sua eficiência na geração da forma que expresse a melhor estrutura.
4. Implementar experimentações utilizando múltiplos modelos de projeto digital e comparar os resultados de uso de diferentes modelos digitais para resolução de diferentes problemas de projetos.
5. Desenvolver e implementar métodos de projeto baseados no Modelo CAD para Avaliação, explorando os potenciais dos softwares de autoria BIM.
6. Desenvolver e implementar métodos de projeto performativo integrando os processos a ferramentas de autoria BIM.

REFERÊNCIAS

- ABOULEZZ, M.; MOKBEL, H.; SALAZER, G.; TOCCI, J. Choosing levels of granularity in building information modeling: contractors's perspective. *In: ARAB SOCIETY FOR COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN (ASCAAD)*, 2007, Alexandria. **Proceeding**... Alexandria: ASCAAD, 2007. Disponível em: <<http://www.ascaad.org/conference/2007/> p. 2007> Acesso em: 5 maio 2008.
- ALEXANDER, C. **Notes on the synthesis of form**. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- ALFARIS, A. Emergence Through Conflict The Multi-Disciplinary Design System 2009. 430 f. Tese (Doctor of Philosophy) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. 2009.
- ALFARIS, A.; MERELLO, R. The generative multi-performance design system. *In: CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA)*, 28., 2008, Minneapolis. **Proceedings**... Minneapolis: ACADIA, 2008. p. 448-457.
- AMBROSE, M. Plan is dead: to BIM, or not to BIM, that is the question. ARAB SOCIETY FOR COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN (ASCAAD), 2006, Sharjah. **Proceeding**... Sharjah: ASCAAD, 2006. Disponível em: <<http://www.ascaad.org/conference/2006/Introduction.php> p. 2006>. Acesso em: 2 set. 2008.
- ANDRADE, M.; RUSCHEL, R. Interoperabilidade Entre ArchiCAD e Revit Por Meio do Formato IFC. *In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, IV*, 2009, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2009.
- ANDREOLI, M. **Alocação de espaços em arquitetura: uma nova metodologia utilizando lógica nebulosa e algoritmos genéticos**. 2000, 390 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.
- ARVIN, S.; HOUSE, D. Modeling architectural design objectives in physically based space planning. **Automation in Construction**, v. 11, n. 2, p. 213-225, 2002.
- ASIMOV, M. **Introduction to design**. New Jersey: Prentice Hall, 1962.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15575-1: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2008.
- BARBER, T.; HANNA, R. Na inquiry into computers in design: attitudes before-attitudes after. **Design Studies**, Elsevier Science, v. 22, n. 3, May 2001.

BARRIOS, C. Parametric Gaudi. *In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS (SIGRADI), 8., 2004, São Leopoldo, RS. Anais...* Sao Leopoldo: Sigradi, 2004.

BARRIOS, C. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. *Design Studio*, [S.I.], v. 27, n. 3, p. 309-324, May, 2006.

BATTY, M.; LONGLEY, P. **Fractal cities: a geometry of form and function**. London: Academic Press, 1994.

BELL, H.; BJØRKHAUG, L. **A building SMART ontology e work and business in architecture, engineering and constructin**. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRODUCT AND PROCESS MODELLING (ECPMP), 6., 2006, Valencia, Spain. Proceedings...*

BERNACCHI, A. Architecture in the age of intelligent machines: my process is less linear than yours. 2010. *Dissertação (Mestrado) – Universidad Politecnica de Madrid, Master en Proyectos Arquitectónicos Avanzados, Madrid, 2010.*

BHATTARAI, A. Sasaki, Mutsuro. **A/E Firms + profiles**. 1.º fev. 2011. Disponível em: <<http://aefirms.wordpress.com/2011/02/01/sasaki-mutsuro/>>. Acesso em: 26 jun. 2011.

BIRX, G. BIM evokes revolutionary changes to architecture practice at ayers/ saint/ gross. **AIArchitect Best Practices**, dez. 2005. Disponível em: <<http://www.aia.org/aiachitect/thisweek05/tw1209/tw1209changeisnow.cfm>>. Acesso em: 23 ago. 2008.

BOLLINGER + GROHMANN. EPFL Rolex-Learning Center, 2011. Disponível em: <<http://www.bollinger-grohmann.de/>>. Acesso em: 12 mar. 2011.

BOLLINGER, K.; GROHMANN, M.; TESSMANN, O. Form, Force, Performance: Multi-Parametric Structural Design. *In: HENSEL, M.; MENGES, A. Versatility and Vicissitude: Performance in morpho-ecological Design. Architectural Design*, Mar.-Abr. 2008. p.20-25.

BOLLINGER, K.; GROHMANN, M.; TESSMANN, O. Structured becoming: evolutionary processes in design engineering. *In: OXMAN, R.; OXMAN, R. (Ed.). The new structuralism: design, engineering and architectural technologies. Architectural Design*, Jul.-Aug. 2010. p.34-39.

BROADBENT, G. **Design in architecture: architecture and the human sciences**. London: John Wiley & Sons, 1973.

BROADBENT, G. Metodologia del disenõ arquitectónico. *In: BROADBENT, G. (Org.). Metodología del diseño arquitectónico*. Gustavo Gili, Barcelona, 1971. p. 21-35.

BURO HAPPOLD. Louvre Abu Dhabi. 2011a. Disponível em: <<http://www.burohappold.com/projects/project/louvre-abu-dhabi-77/>>. Acesso em: 14 maio 2011.

BURO HAPPOLD. SMART Solutions. 2011b. Disponível em: <<http://www.burohappold.com/buildings/building-fabric/smart-solutions/>>. Acesso em: 26 maio 2011.

CALDAS, L. An Evolution-Based Generative System: using adaptation to shape architectural form. 2001. 299f. *Tese (Doctor of Philosophy) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 2001.*

CASTRO, L.; VON ZUBEN, F. Introdução à computação evolutiva. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, 2009. 18 f. **Notas de aula.**

CELANI, G. Generative designs in architecture: history and applications with the new production methods. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ARQUITECTURA EMERGENTE (SIMAE 08), 1., 2008, Barcelona. **Anais...** Barcelona, 2008.

CELANI, G.; CANCHERINI, L. Digitalização tridimensional de objetos: um estudo de caso. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS (SIGRADI), 13., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sigradi, 2009.

CELANI, G.; CYPRIANO, D.; GODOI, G.; VAZ, C. A gramática da forma como metodologia de análise em arquitetura. **Conexão: Comunicação e Cultura**, Caxias do Sul, v. 5, n. 10, p. 180-197, dez. 2006. Disponível em: <<http://hermes.ucs.br/cchc/deco/conexao/design.pdf>> Acesso em: 15 out. 2009.

CERULLI, C. Capitalising on knowledge embodied in design practice. In: LEEUWEN, J.; TIMMERMANS (Ed.) **Innovations in design and decision support systems in architecture and urban planning**. Springer, 2006. p. 277-292.

CHESSA, M. Paris: réaménagement sensationnel en vue pour le premier étage de la tour Eiffel. **Le Moniteur**, 11 out. 2011. Disponível em: <<http://www.lemoniteur.fr/155-projets/article/actualite/863547-paris-reamenagement-sensationnel-en-vue-pour-le-premier-etage-de-la-tour-eiffel>>. Acesso em: 15 out. 2011.

DELEUZE, G.; GUATTARI, F. **O que é a filosofia?** São Paulo: Editora 34, 2000.

DORST, K.; IJKHUIS, J. Comparing paradigms for describing design activity. **Design Studies**, v. 16, n. 2, p. 261-274, 1995.

EASTMAN, C. Automated assessment of early concept designs. **Architectural Design**, n. 199, p. 52-57, May-Jun. 2009.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. **Rolex Learning Center**. EPFL Press Information, Jun, 2010.

ENVIRONMENTAL SIMULATION CENTER (ESC). **Planning and design in an information rich, interactive, visually compelling digital environment that enables open and informed, democratic decision-making**. New York, 2005. Disponível em: <<http://www.simcenter.org/>>. Acesso em: 11 set. 2010.

EUROSTEP. **EuroSTEP**. 2007. Disponível em <<http://www.eurostep.com/>>. Acesso em: 3 nov. 2010.

FARLEX. **The free dictionary**. 2010. Disponível em: <<http://www.thefreedictionary.com/>>. Acesso em: 17 dez. 2010.

FASOULAKI, E. *Integrated design: a generative multi-performance design approach*. 2008. 72 f. **Dissertação** (Master of Science) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, (Mass.), 2008.

FERREIRA, A. **Novo dicionário eletrônico Aurélio versão 5.0**. São Paulo: Regis Ltda, 2004. CD-ROM.

FLEMMING, U. **SEED: a software environment to support the early phases in building design**. 2006. Disponível em: <<http://www.seedling.org/OverView.html>>. Acesso em: 19 abr. 2009.

FLORIO, Wilson. Contribuições do building information modeling no processo de projeto em arquitetura. *In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL*, 3., 2007, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: Integração em Sistemas em Arquitetura, Engenharia e Construção, 2007.

FOGEL, L.; OWENS, A.; WALSH, M. **Artificial intelligence through simulated evolution**. New York: Wiley & Sons, 1966.

FOSTER + PARTNERS. **Smithsonian Institution**. 2011. Disponível em: <<http://www.fosterandpartners.com/Projects/1276/Default.aspx>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

FRAZER, J. **An evolutionary architecture**. London: The Architecture Association, 1995.

FREIBERGER, M. Perfect buildings: the maths of modern architecture. + **Plus Magazine**, Issue 42, 2007. Disponível em: <<http://plus.maths.org/content/perfect-buildings-maths-modern-architecture>>. Acesso em: 14 dez. 2010.

FU, C.; AOUAD, G.; LEE, A.; MASHALL-PONTING, A.; WU, S. IFC model viewer to support nD model application. **Automation in Construction**, v. 15, n. 2, Mar. 2006. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/autconp.2006>>. Acesso em: 14 set. 2008.

GIL, A. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 3a ed. São Paulo: Atlas, 1996. 159 p.

GOLDSCHMIDT, G. The dialectics of sketching. **Creativity Research Journal**, v. 4, p. 123-143, 1991.

GRAPHISOFT. **BIM curriculum lecture notes**. v. 1, LECTURE NOTES, 2007. Disponível em: <<http://www.graphisoft.com, 2007.>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

GROHMANN, M.; BOLLINGER, K.; WEILANDT, A. WAGNER, M. Form finding of the shell structures of the Rolex Learning Center in Lausanne. *In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES (IASS)*, 2009, Valencia. **Proceedings...** Valencia: IASS, 2009. p. 654-665.

GUIDERA, S. BIM application in design studio: an integrative approach developing student skills with computer modeling. *In: THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA)*, 2006, Louisville. **Proceeding...** Louisville: ACADIA, 2006. p. 213-227.

HAAGENRUD, S.; HYVÄRINEN, J.; BELL, H.; BJØRKHAUG, L.; LIEBICH, T. **STAND-INN Deliverable D15 IFC and IFD feasibility for innovative sustainable housing**. EUROPA INNOVA, 2007, 89 p. Disponível em: <http://standards.eu-innova.org/Files/Report/STAND-INN_D15_IFC_and_IFD_feasibility_for_innovative_sustainable_housing.pdf>. Acesso em: 16 set. 2009.

HENSEL, M.; MENGES, A. Versatility and Vicissitude: Performance in morpho-ecological Design. **Architectural Design**, Mar.-Abr. 2008. 144p.

HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M. **Emergent technologies and design: towards a biological paradigm for architecture**. New York: Routledge, 2010.

HENSEL, M.; SUNGUROGLU, D.; MENGES, A. Material performance. In: HENSEL, M.; MENGES, A. Versatility and Vicissitude: Performance in morpho-ecological Design. **Architectural Design**, Mar.-Abr. 2008. p. 34-41.

HERMUND, A. Building information modeling in the architectural design Phases. *In: CONFERENCE ON EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE: COMPUTATION: The New Realm of Architectural Design (ECCAD09), 27., 2009, Çolakoglu. Proceeding...* Çolakoglu: Çagdas, 2009. p. 75-81.

HERZOG, T. Performance Form. In: KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **Performative architecture: beyond instrumentality**. New York: Spon Press, 2005. p. 71-84.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Michigan: The University of Michigan, 1975.

HOLM, M.; KJELDSEN, K. (Org.) **Cecil Balmond: frontiers of architecture I**. Humlebæk: Louisiana Museum of Modern Art, 2008.

HOLZER, D. Optioneering in Collaborative Practice. **International Journal of Architectural Computing**. Multi Science Publishing. v.8, n. 2, p.165-182, June. 2010.

HOLZER, D. Sense-making across collaborating disciplines in the early stages of architectural design. **Tese (Doctor of Philosophy) – School of Architecture and Design, Design and Social Context Portfolio**, RMIT University, Melbourne, 2009.

HUANG, X.; XIE, Y. **Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications**. Oxford: Wiley, 2010.

IBRAHIM, M. *et al.* A web-based approach to transferring architectural information to the construction site based on the BIM object concept. In: THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA): CULTURE, TECHNOLOGY AND ARCHITECTURE, Korea. **Proceeding...**Korea: CAADRIA, 2004. Disponível em: <<http://www.caadria.org/cnf/2004.conf.html>>. Acesso em: 14 out. 2008.

INNOVATIVE STRUCTURES GROUP. ISG, 2009. Disponível em: <<http://www.isg.rmit.edu.au/index.html>>. Acesso em: 29 nov. 2010.

INTERNATIONAL ALLIANCE FOR INTEROPERABILITY. Model: Industry Foundation Classes (IFC). **Building Smart**, 2008. Disponível em: <http://www.buildingsmart.com/bim> Acesso em: 27 abr. 2009.

ISOZAKI, A. Centro culturale Kitagata. **Casabella**, anno 71, n. 752, p. 38-45, feb. 2007.

IWAMOTO, L. **Digital fabrications: architectural and material techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

JERNIGAN, F. **Big BIM little bim: the practical approach to building information modeling integrated practice done the right way!** 2. ed. Salisbury: 4 Site Press, 2007.

JONES, C. Informe sobre la situación de la metodología del diseño. In: BROADBENT, G. (Org.). **Metodología del diseño arquitectónico**. Gustavo Gili, Barcelona, 1971. p. 385-395.

JONES, J. C.; THORNLEY, D. G. **Conference on design methods: papers**. New York: Pergamon Press, 1963.

KALAY, Y. **Architecture's new media: principles, theories and methods of computer-aided design**. Cambridge (Mass.): MIT Press, 2004.

KALAY, Y. Performance-based design. **Automation in Construction**, n. 8, p. 395-409, 1999.

KALAY, Y. The impact of information technology on design methods, products and practices. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 357-380, May. 2006.

KIVINIEMI, A.; TARANDI, V.; KARLSHØJ, J.; BELL, H.; KARUD, O. **Review of the development and implementation of IFC compatible BIM: final report of the Erabuild Project**. Erabuild, 2008. Disponível em: <<http://www.ebst.dk/file/9498/ReviewoftheDevelopmentandImplementationofIFCcompatibleBIM.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2009.

KLEIBER, M. Le premier étage de la tour Eiffel sera entièrement réaménagé. **LE JDD**, Paris, 11 out. 2011. Disponível em: <<http://www.lejdd.fr/JDD-Paris/Actualite/Le-premier-etage-de-la-tour-Eiffel-sera-entierement-reamenage-404867/>>. Acesso em: 15 out. 2011.

KNIGHT, T. Shape grammars in education and practice: history and prospects. **International Journal of Design Computing**, Key Centre of Design Computing, Faculty of Architecture, University of Sydney, v. 2, 1999-2000.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. New York: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, B. Towards the performatice in architecture. In: KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **Performative architecture: beyond instrumentality**. New York: Spon Press, 2005. p. 203-214.

KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **Performative architecture: beyond instrumentality**. New York: Spon Press, 2005.

KOLODNER, J. An introduction to case-based reasoning. **Artificial Intelligence Review**. Netherlands, v. 6, n. 1, p. 3-34, Mar. 1992.

KOS, J. R. ; CABRAL FILHO, J. S. ; MASCARENHAS, E. ; TRAMONTANO, M. ; MALVEIRA, T. . Ateliês colaborativos de projeto low-tech à distância. In: Diana Rodríguez Barros. (Org.). **Experiencia digital: usos, practicas y estrategias en talleres de arquitectura y diseño en entornos virtuales**. Mar del Plata: Universidad de Mar del Plata, 2006, v. , p. 163-172. Disponível em: <<http://www.nomads.usp.br/site/livraria/livraria.html>>. Acessado em: 16 set. 2011.

KRYGIEL, E.; NIES, B. **Green BIM: Successful sustainable design with building information modeling**. Indianapolis: Wiley Publishing, 2007.

- LAISERIN, J. Business games. *In: Allplan News: Magazine for Architects and Engineers*, 2008. Interview.
- LANE, T. Steel yourself: The Qatar National Convention Centre. **Building.co.uk**, 27 mar. 2009. Disponível em: <<http://www.building.co.uk/steel-yourself-the-qatar-national-convention-centre/3137052.article>>. Acesso em: 22 abr. 2011.
- LAVA. **Laboratory for Visionary Architecture**. 2011. Disponível em: <<http://www.l-a-v-a.net/>>. Acesso em: 2 fev. 2011.
- LAWSON, B. **How designers think: the design process demystified**. 4 ed. Oxford: Elsevier/ Architectural, 2005.
- LAWSON, B. **What designers know?** Oxford [England]: Elsevier/ Architectural Press, 2004.
- LEATHERBARROW, D. Architecture's unscripted performance. In: KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **Performative architecture: beyond instrumentality**. New York: Spon Press, 2005. p. 5-20.
- LEE, G.; SACKS, R.; EASTMAN, C. M. Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system. **Automation in Construction**, v. 15, n. 6, p.758-776, 2006.
- LEUPPI, J.; SHEA, K. The Hylomorphic project. **The ARUP Journal**, London, p. 28-30, Jan. issue, 2008.
- LIGGETT, R. Automated facilities layout: past, present and future. **Automation in Construction**, v. 9, n. 2, 197-215, mar. 2000.
- LINKOV, I.; SATTERSTROM, F.; STEEVENS, J. FERGUSON, E.; PLEUS, R. Multi-criteria decision analysis and environmental risk assessment for nanomaterials. **Journal of Nanoparticle Research**. n. 9, p. 543-554, Springer, 2007.
- LUEBKEMAN, C. Performance-based design. In: KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. New York: Spon Press, 2003. p. 275-288.
- MAHER, M.; POON, J. Modelling design exploration as co-evolution. **Microcomputers in Civil Engineering**, v. 11, n. 3, p. 195-209, 1996.
- MAHER, M.; ZHANG, D. CADSYN: using case and decomposition knowledge for design synthesis. In: GERO, J. (Ed.) **Artificial intelligence in design**. Oxford: Butterworth-Heinmann, 1991.
- MALKAWI, A. Performance simulation: research and tools. *In: KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. Performative architecture: beyond instrumentality*. New York: Spon Press, 2005. p. 85-96.
- MANGELSDORF, W. Structuring strategies for complex geometries. In: OXMAN, R.; OXMAN, R. (Ed.) **The new structuralism: design, engineering and architectural technologies**. **Architectural Design**. Jul.-Aug. 2010.
- MANIBO, M. French culture minister heads delegation to UAE capital to seal Louvre abu Dhabi operating framework. **AMEinfo.com**, 7 Jan. 2008. Disponível em: <<http://www.ameinfo.com/143289.html>>. Acesso em: 28 abr. 2011.

MARCZYK, A. **Genetic algorithms and evolutionary computation**. In: THE TALK ORIGINS ARCHIVE: exploring the creation/ evolution controversy. 2004. Disponível em: <<http://www.talkorigins.org/faqs/genalg/genalg.html>>. Acesso em: 23 ago. 2009.

MARKUS, T. El Dimensionado y la valoración del proceso de ejecución de um edificio como método de diseño. In: BROADBENT, G. (Org.). **Metodología del diseño arquitectónico**. Barcelona: G. Gili, 1971. p. 235-256.

MARSH, A.J. **Performance Analysis and Conceptual Design**. 1997. Thesis (Ph.D.) University of Western Australia, [S.I.], 1997.

MENGES, A. Instrumental Geometry. **Architectural Design**, v. 76, Issue 2, p. 42-53, Mar./ Apr. 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ad.v76:2/issuetoc>>. Acesso em: 16 jan. 2011.

MEREDITH, M. Never enough: transform, repeat ad nausea. In: MEREDITH, M; SAKAMOTO, T.; FERRÉ, A. (Ed.) **From control to design: parametric/ algorithmic architecture**. Barcelona: Actar, 2008. p. 4-33.

MEREDITH, M; SAKAMOTO, T.; FERRÉ, A. (Ed.) **From control to design: parametric/ algorithmic architecture**. Barcelona: Actar, 2008.

MESAROVIC, M. **Views on general systems theory**. New York: Wiley, 1964.

MITCHELL, M. Evolutionary computation. In: MITECS, Massachusetts Institute of Technology, 1999. Disponível em: <[HTTP://cognet.mit.edu/MITECS/Articles/mitchell](http://cognet.mit.edu/MITECS/Articles/mitchell)>.

MITCHELL, W. J.; MCCULLOUGH, M. **Digital design media: a handbook for architects and design professionals**. 2. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1995.

MITCHELL, W. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. **Environment and Planning B**, v. 2, p. 127-150, 1975.

MORAES, R. Análise de Conteúdo: limites e possibilidades. In: ENGERS, M.E.A. (Org). **Paradigmas e metodologias de pesquisa em educação**. Porto Alegre, EDIPUCRS, 1994.

MUTHER, R. **Systematic layout planning (SLP)**. 2. ed. Boston: Cahners Books, 1974.

NAFAS. Cultural District on Saadiyat Island, Abu Dhabi: facts, information, photos. **Nafas Art Magazine**, Nov. 2007. Disponível em: <http://universes-in-universe.org/eng/nafas/universe.org/eng/nafas/articles/2007/saadiyat_cultural_district/projects/louvre_abu_dhabi>. Acesso em: 28 abr. 2011.

NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES (NIBS). United States National Building Information Modeling Standard: overview, principles and methodologies: transforming the building supply chain through open and interoperable information exchanges. **National BIM Standard**, dez. 2007. version 1, part 1. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/bim/nbims.php>> Acesso em: 22 maio 2009.

OASIS. **Advancing open standards for the information society**. 2005. Disponível em: <<http://www.oasis-open.org/specs/>>. Acesso em: 26 set. 2009.

OLABUÉNAGA, J. I. R.; ISPIZUA, M. A. **La descodificación de la vida cotidiana: Métodos de investigación cualitativa.** Bilbao: Universidad de Deusto, 1989.

ONUMA, K. Twenty first century architect: transformed by process not software. *In: ONUMA White Papers*, 2007. Disponível em: <http://onuma.com/services/onuma_V4c.pdf> Acesso em: 24 nov. 2008.

ONUMA, K.; DAVIS, D. Integrated facility planning using BIM Web portals. **The Federal Facilities he National Academies**, Washington D.C., Oct. 2006.

ONUMA. ONUMA PLANNING SYSTEM (OPS). 16 fev. 2008. Disponível em: <<http://onuma.com/products/OnumaPlanningSystem.php>>. Acesso em: 25 out. 2008.

OXMAN, N. Material-based design computation. 2010. 330 f. **Tese (Doctor of Philosophy)** – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. 2010.

OXMAN, R. Observing the observers: research issues in analysing design activity. **Design Studies**, [S.I.], v.16, p. 275-283, 1995.

OXMAN, R. Theory and design in the first age. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 229-265, 2006.

OXMAN, R. A Performance-based model in digital design: PER-FORMATIVE-design beyond aesthetic. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 3, p. 169-180, 2007.

OXMAN, R. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, v. 29, n. 2, p. 99-120, 2008a. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/destud>. Acesso em: 10 jan. 2009.

OXMAN, R. Performance-based design: current practices and research issues. **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2008b.

OXMAN, R. Digital tectonics as a morphogenetic process. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES (IASS). **Proceedings... Symposium**. Valencia, Proceedings... 2009a. p. 938-948.

OXMAN, R. Performative design: a performance-based model of digital architectural design. **Environmental and Planning B** (in press), v. 36, 2009b. p. 1026-1037.

OXMAN, R.; OXMAN, R. (Ed.) **The new structuralism: design, engineering and architectural technologies.** **Architectural Design**, Jul.-Aug. 2010.

PAGE, J. Review of papers presented at the conference. *In: JONES, J.; THORNLEY, D. (Ed.) Conference on design methods.* Oxford: Pergamon Press, 1963.

PEDRESCHI, R. Form, force and structure: a brief history. In: HENSEL, M.; MENGES, A. Versatility and Vicissitude: Performance in morpho-ecological Design. **Architectural Design**, Mar.-Abr. 2008. p.12-19.

PENTTILÄ, H. Early Architectural design and BIM. *In: INTERNATIONAL CAADFUTURES CONFERENCE: Computer-Aided Architectural Design Futures (CAADFutures)*, 12., Sydney, Australia, 2007. **Proceedings... Sydney: A. DONG; A. MOERE; J. GERO**, 2007.

PETERS, B. The Smithsonian Courtyard Enclosure: a case-study of digital design processes. In: THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 27., 2007, Halifax. **Proceeding...** Halifax: ACADIA, 2007. p.74-83.

PHOENIX. **PHX ModelCenter 10.0: Design Process Optimization.**, 2011 Disponível em: <http://www.phoenix-int.com/software/phx_modelcenter.php>. Acesso em: 19 abr. 2011.

PICON, A. Algorithmic architecture or the computer as a double?: Foreword. *In*: TERZIDIS, K. **Algorithmic architecture**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2007.

PIÑÓN, H. Representação gráfica do edifício e construção visual da arquitetura. **Portal Vitruvius: Arqtextos**, 104, 2 jan. 2008. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/arqtextos/arq104/arq104_02.asp>. Acesso em: 3 abr. 2008.

PRESKIL, H.; TORRES, R. **Evaluative inquiry for learning in organizations**. Thousand Oaks, Calif.; London: Sage Publications, 1999.

PRESKILL, H. S.; TORRES, R. T. **Evaluative inquiry for learning in organizations**. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 1999.

PUPO, R.; CELANI, G. Implementando a fabricação digital e a prototipagem rápida em cursos de arquitetura: dificuldades e realidades. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS (SIGRADI), 14., 2008, Habana. **Anais...** Habana: Sigradi, 2008.

QATAR NATIONAL CONVENTION CENTRE. New venue of choice in the Middle East. 2009. Disponível em: <http://www.qatarconvention.com/site/en/Explore_the_Centre/Spaces_and_Rooms.aspx>. Acesso em: 26 abr. 2011.

QUERIN, OM; YOUNG, V.; STEVEN, GP.; XIE, Y. M. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization. **Comput Methods Appl. Mech. Eng.** 189, p. 559-573. 2000.

RFR. **Facades**. 2010c. Disponível em: <<http://www.rfr-group.com/index.php?id=106&L=1>>. Acesso em: 3 fev. 2011.

RFR. **Introduction**. 2010b. Disponível em: <<http://www.rfr-group.com/index.php?id=64&L=1>>. Acesso em: 3 fev. 2011.

RFR. **Presentation**. 2010a. Disponível em: <<http://www.rfr.fr/index.php?Menu1=Presentation&Menu2=Introduction>>. Acesso em: 3 fev. 2011.

RITTEL, H. Design methods: theories, research, education and practice: **Impressions of Architecture 130: notes and observations on Professor Host W.j. Rittel's classic design methods course at Berkeley as taught circa-1969-1971. The Design Methods Institute**, v. 29, n. 1, p. 2.109-2.156, jan.-mar., 1995.

ROWE, Peter. **Design thinking**. 6. ed. Cambridge, Mass.: Mit press, 1998.

RUSSEL, P.; ELGER D. The Meaning of BIM: Towards a Bionic Building. In: ECAADE, 26, 2008, Antwerpen. **Proceeding...** Antwerpen: eCAADe26, 2008.

SASAKI, M. **Flux structure**. Tokyo: TOTO Shuppan, 2005.

- SASAKI, M. Morphogenesis of flux structure. In: MEREDITH, M; SAKAMOTO, T.; FERRÉ, A. (Ed.) **From control to design: parametric/ algorithmic architecture**. Barcelona: Actar, 2008. p. 68-115.
- SASS, L.; OXMAN, R. Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. *Design Studies*, v. 27, n. 4, p. 53-69, Nov. 2006.
- SCH EIN, M.; TESSMANN, O. Structural analysis as driver in surface-based design approaches. *International Journal of Architectural Computing*, Issue 1, v. 6, p. 19-38, 2009.
- SCHEURER, F. Materialising complexity. In: OXMAN, R.; OXMAN, R. (Ed.). *The new structuralism: design, engineering and architectural technologies*. **Architectural Design**, p. 86-93, Jul.-Aug. 2010.
- SCHÖN, D. **The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action**. Michigan: Basic Books, 1983, 374 p.
- SCHÖN, D. **Educating the reflective practitioner**. San Francisco: Jossey-Bass, 1987.
- SCHÖN, D. **La formación de profesionales reflexivos: hacia un nuevo diseño de la enseñanza y el aprendizaje en las profesiones**. Barcelona: Paidós, 1992. , 9-32.
- SCHÖN, D.; WIGGINS, G. Kinds of seeing and their functions in designing. *Design Studies*, v. 13, p. 135-156, 1992.
- SCRIVEN, M. **Evaluation thesaurus**. 4. ed. Newbury Park, CA: Sage, 1991.
- SHEA, K.; AISH, R.; GOURTOVAIA, M. Towards integrated performance-based generative design tools. In: DOKONAL, W. (Ed.) *Digital design: proceedings of the 21st conference on education in computer aided architectural design in Europe*. Graz: Graz University of Technology, 2003. p. 553-560.
- SHEA, K. Directed randomness. In LEACH, N; TURNBULL, D.; WILLIAMS, C. (Ed.) **Digital tectonics**. London: Wiley-Academy, 2004. p. 89-101.
- SLESSOR, C. Atlantic Star. **The Architectural Review**, vol. 202, 1997.
- SOLIBRI. **Solibri Model Checker: for Better Quality & Higher Accuracy**. Getting Started. Solibri Inc. 2009. 12f. Apostila. Disponível em: <www.solibri.com>. Acesso em: 21 jan. 2009.
- SPUYBROEK, L. **Research & design: the architecture of variation**. New York: Thames & Hudson, 2009.
- STEELE, J. **Arquitectura y revolucion digital**. Barcelona: G. Gili, 2001.
- SUCCAR, B. Building information modeling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, v. 18, n. 3, p. 357-375, 2009. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/autcon>. Acesso em: 26 jan. 2010.
- SUWA, M; TVERSKY, B. What do architects and perceive in their design protocol analysis. *Design Studies*, v. 18, n.4, p. 385-103, out. 1997.
- SUWA, M.; PURCELL, T; GERO, J. Macroscopic analyses of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions. *Design Studies*, v.19, n.4, p. 455-483, out. 1998.

- SZALAPAJ, Peter. **Contemporary architecture and the digital design process**. Oxford: Elsevier, 2005.
- TANG, H. **Exploring the Roles of Sketches and knowledge in the Design Process**. 2001. 149f. Tese (Doctor of Philosophy) – Department of Architectural and Design Science, Faculty of Architecture, The University of Sydney, Sydney, 2001.
- TARA, S. Education City Convention Centre, Qatar by Arata Isozaki, Tokyo. **CUBE ME.com** 8 fev. 2010. Disponível em: < <http://cubeme.com/blog/2010/02/08/education-city-convention-centre-qatar-by-yamasaki-architects/> >. Acesso em: 29 abr. 2011.
- TERZIDIS, K. **Algorithmic architecture**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2007.
- TESSMANN, O. **Collaborative design procedures: for architects and engineers**. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2008.
- TOBIN, J. Proto-building: to BIM is to build. **AECbytes**, 28 May. 2008. Disponível em: <<http://www.aecbytes.com/buildingthefuture/2008/ProtoBuilding.html>> Acesso em: 3 out. 2008.
- TRELDAL, N. **Integrated data and process control during BIM Design**: focused on integrated design of energy and indoor climate conditions. 2008. 220 f. Master's Thesis – Department of Civil Engineering (BYG-DTU). Technical University of Denmark, Brovej, 2008.
- TROGEMANN, G.; VIEHOFF, J. Code Art - Eine elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik, Springer-Verlag Wien, 2005. *Apud* TESSMANN, O. **Collaborative Design Procedures: for Architects and Engineers**. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2008.176p.
- VOLLERS, k. **Twist & build: creating non-orthogonal architecture**. Rotterdam: 010 Publishers, 2001.
- VRIES, M.; WAGTER, H. A CAAD model for use in early design phases. *In*: McCULLOUGH, M.; MITCHELL, W.; PURCELL, P. **The electronic design studio: architectural knowledge and media in the computer era**. Cambridge: MIT Press, 1991.
- WEILANDT, A.; GROHMANN, M.; BOLLINGER, K.; WAGNER, M. Rolex Learning Center in Lausanne: from conceptual design to execution. *In*: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES (IASS), 2009, Valencia. **Proceedings...** Valencia: IASS, 2009. p. 640-653.
- WORTMANN, Thomas. **Portfolio**. 2011. Disponível em: <http://www.thomaswortmann.eu/Thomas_Wortmann_Portfolio.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2011.
- XIE, Y.; STEVEN, G. Shape and layout optimisation via an evolutionary procedure. **Proceedings...**International Conference on Computational Engineering Science, Hong Kong, 1992. 471p.
- XIE, Y.; STEVEN, G. A simple evolutionary procedure for structural optimization. **Computers & Structures**, 49, p.885-896, 1993.
- XIE, Y.; STEVEN, G. **Evolutionary Structural Optimization**. London: Springer, 1997.
- XIE, Y.; ZUO, Z.; HUANG, X.; TANG, J.; ZHAO, B.; FELICETTI, P. Architecture and Urban Design through Evolutionary Structural Optimisation Algorithms. **Keynote Lecture** by Prof. Mike Xie at the

International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design. ALGODE: Tokyo, Mar. 14-16, 2011.

YANG, XY; XIE, Y. M; STEVEN, G. P; QUERIN, O. M. Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization. **Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics** *AIAA J*, v. 37, n. 11, p. 1.483-1.488, 1999.

APÊNDICES

Apêndice A - Questionário aplicado durante as entrevistas aos escritórios visitados

QUESTIONNAIRE

THE NEW STRUCTURALISM: Performative design in recent architectural practice

Max Andrade
PhD Student

Supervisor:

Prof. Rivka Oxman PhD
Vice Dean for Academic Affairs
Faculty of Architecture and Town Planning
TECHNION IIT, Haifa Israel

Prof. Regina C. Ruschel PhD
School of Civil Engineering,
Architecture and Urban Design
Department of Architecture and Building Construction
UNICAMP, São Paulo, Brasil

PART 1

The first part of the interview aims to understand the daily design process practice. There are three subjective questions about the architectural form generation.

Based on the projects in which your office is involved:

(Question 1) Could you describe how the architectural form generation process is conducted?

(Question 2) What are the boundaries between the architect and the engineer's roles in defining architectural form? Is the form of the building defined by the architects, by the engineers or in a collaborative process?

(Question 3) Does the design process use performance driven form generation (or formation) guided by automated or semi-automated digital tools? If yes, could you briefly describe it?

PART 2

The second part of the interview is more specific. It aims to understand the architectural form generation in design practice. The first task is to select one of your building design projects whose design process was similar to the concept of performative design¹. Then some topics related to the selected PROJECT are discussed. Subjective questions and multiple-choice questions are asked on form generation, techniques used and software or developing resources.

¹*Performative design “is based on formation processes driven by analytical techniques that can directly modify the geometric model” (OXMAN, 2009)*

PROJECT NAME _____

Form generation and techniques – TOPIC 1

(Question 4) Could you describe the form generation process?

(4.1) When digital technique for form generation (or formation) was used, which were the geometrical principles of the initial shape?

- (a) **Basic shape** (Designer concepts are delineated by a basic geometry, as a starting point for the form generation. Mechanisms are applied to the elemental form resulting in a new geometry.)
- (b) **Conceptual shape** (General principles of geometry have already been defined, but geometric transformations remain to be done.)
- (c) **Other**

(4.2) Form generation can be based on simple (basic mathematical geometry) or complex geometric structure. Which type of geometrical structure was applied to the form generation?

- (a) **Basic Mathematical Geometry** (Simplified geometry incorporating a limited universe of types of forms.)
- (b) **Simple Mathematical Geometry** (Complex geometries that are based on Basic Mathematical Geometry.)
- (c) **Form-finding** (Design of engineered minimal surfaces based on physical constraints.)
- (d) **Free Form** (Development of the form independent of either physical constraints or the limitations of the simple mathematical geometries.)
- (e) **Other**

(4.3) During the decision sequence different decision support techniques are used. Could you check in the list below which decision support techniques were used?

- | | |
|------------------------------------|---|
| (a) Parametric design | (g) Computational Fluid Dynamics |
| (b) Shape grammar | (h) Simulated annealing |
| (c) Cellular Automata | (i) Prototyping |
| (d) Genetic Algorithms | (j) Artificial neural network |
| (e) Evolutionary algorithms | (k) Simplex |
| (f) Finite element analysis | (l) Other |

(4.4) Different types of techniques are used in different design tasks. Could you relate the techniques described above to one of the decision sequence stages? Consider the following stages:

- (a) **Generation**
- (b) **Evaluation**
- (c) **Simulation**
- (c) **Optimization/performance**
- (d) **Representation**

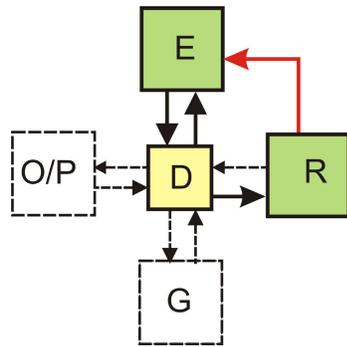
(4.5) The computational techniques used in form generation (or formation) have been undergoing a gradual increase in automation, so that the computer (using one technique or various techniques) can be programmed to find an optimal form solution (ex. Evolutionary Structural Optimization). Considering the above, I would like to ask you what level of automation was used for form generation?

- (a) **Automated** (A mechanism is created to form making, independent of designers participation.)
- (b) **Semi-automated** (The form making process included alternate automated and manual decision stages.)
- (c) **Manual** (The generation process was completely manual.)

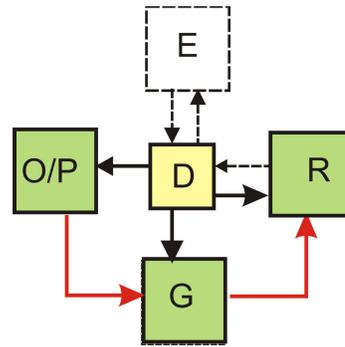
(4.6) Along the form generation some performances will determine architectural form generation (or formation). These performances are characterized by forces. Could you indicate the forces that were applied in form generation?

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| (a) Structural loads | (h) Thermal |
| (b) Acoustics | (i) Air-flow |
| (c) Winds | (j) Movement |
| (d) Heating | (k) Program |
| (e) Optimization of energy | (l) Noise |
| (f) Natural light | (m) Site perspective |
| (g) ventilation | (n) other |

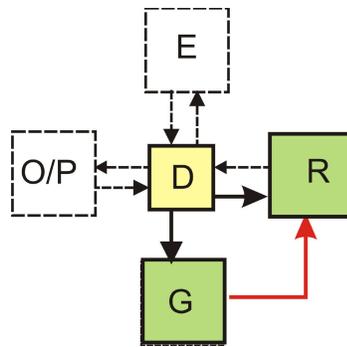
(4.7) Which of the following figures most represent the generic scheme of design models and methodologies?



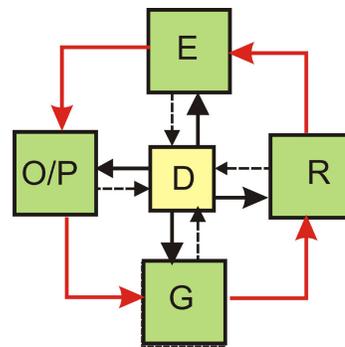
(a) Generation evaluation CAD



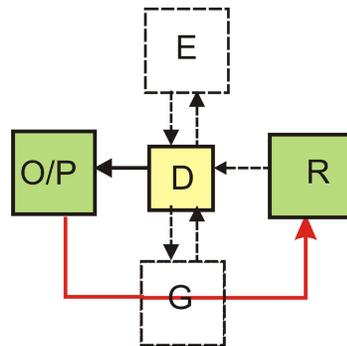
(d) Performance-based generation



(b) Generative design



(e) Integrated



(c) Performance-based formation

Central position
D – Designer

Components
R – representation
E – evaluation
O/P – optimization/ performance
G – generation

Relationships
Automated 
Explicit link 
Implicit link 

Software/ programming environments – TOPIC 2

(Question 5) What were the criteria for choosing software or programming environments for form generation?

To understand the profile of the skills required to implement methods and techniques we tried to identify some characteristics of the software used for form generation. The next questions should apply to each software solution that was used during the initial design process.

(5.1) Could you specify the Software or programming environments? (name)

Software/ p. environment A	Software/ p. environment D
Software/ p. environment B	Software/ p. environment E
Software/ p. environment C	Software/ p. environment F

(5.2) For which cycle decision stage was the software used?

- (a) **Form generation**
- (b) **Evaluation**
- (c) **Simulation**
- (d) **Form optimization**
- (e) **Representation**

Software/ p. environment A	Software/ p. environment D
Software/ p. environment B	Software/ p. environment E
Software/ p. environment C	Software/ p. environment F

(5.3) Which type of software solution or programming environment did you use?

- (a) **Commercially available software/ computer application**
- (b) **Customized commercially available software/ computer application**
- (c) **Developed by your office – used in different projects**
- (d) **Developed by your office – for a unique project**
- (e) **Other**

Software/ p. environment A	Software/ p. environment D
----------------------------	----------------------------

 Software/ p. environment B

 Software/ p. environment E

 Software/ p. environment C

 Software/ p. environment F

(5.4) What were the skills required to use the software?

- (a) **Basic knowledge** (any designer can easily uses)
- (b) **Advanced knowledge** (need to develop some abilities)
- (c) **Developed advance capacity to script** (need to be skilled in computer programming)
- (d) **Other**

 Software/ p. environment A

 Software/ p. environment D

 Software/ p. environment B

 Software/ p. environment E

 Software/ p. environment C

 Software/ p. environment F

Interoperability – TOPIC 3

(Question 6) What is the level of interoperability between the computer applications used for form generation, for the development of the architectural/ engineering design and for the construction of the building?

6.1 What are the most used file-sharing formats?

Part 3

The third part of the interview aims to understand the team work and mode of collaboration

(Question 7) How could you describe the profile of your staff?

(Question 8) Could you identify different agents (internal and external) in/to the office?

(Question 9) Could you graphically describe team collaboration in a simple scheme?

Apêndice B - Segmentos dos protocolos visuais

Categorias Perceptuais

Aula 1

Grupo 2

Categoria Perceptual			
Segmento 1 (19h30)		Segmento 2 (20h5min)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
P-o	Observa possibilidades de implantação do programa no terreno - "maior consciência de como o terreno é"	P-o	Observa possíveis relações de proximidade e afastamento entre as várias construções do terreno
P-o	Estuda relações entre áreas de fluxos e áreas livres no terreno	P-c	Compreende relações de proximidade, afastamento e alinhamento dos blocos pré-fabricados e desses com o novo edifício
P-c	Compreende os diferentes níveis do terreno		
p-c	Percebe que precisam de muitas vagas para o estacionamento		
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h15)	
P-o	Observa relações entre volumes dos blocos pré-fabricados e do novo edifício	P-o	Observa as novas relações entre volumes, relações cheios/vazios e possíveis elementos agregados à solução
P-c	Compreende relações entre blocos e suas influências na movimentação de pessoas no terreno	P-c	Compreende os efeitos da organização radial e seus possíveis enfoques.

Grupo 4

Categoria Perceptual			
Segmento 1 (19h40)		Segmento 2 (20h10)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
P-o	Discute programa e possibilidades de implantação do programa no terreno	P-c	Testa relações espaciais entre blocos pré-fabricados e dele com o terreno
		P-c	Procura estabelecer agrupamentos dos blocos no terreno e eixo focal para disposição de novo edifício
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h10)	
P-d	Estabelece meta de definir novo programa dentro de único edifício	P-o	Discute possíveis locais para implantação do novo edifício
P-o	Discute conceitualmente a proposta, destacando principais elementos visuais e articulações desejadas		
P-c	Compreende relações espaciais e articulações formais	P-o	Discute meios de estruturação e materiais para serem usados nas ideias esboçadas.

Grupo 5

Categoria Perceptual			
Segmento 1 (19h20)		Segmento 2 (19h50)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
P-o	Discute a organização dos blocos pré-fabricados no terreno	P-o	Estuda possíveis relações de proximidade e afastamento entre blocos pré-fabricados
P-o	Discute como organizar o novo programa no terreno, se em um ou mais blocos e um ou mais pavimentos	P-o	Estuda possíveis relações entre novo edifício e blocos pré-fabricados
		P-d	Investiga relações entre blocos pré-fabricados e deles com os novos edifícios
Segmento 3 (20h20)		Segmento 4 (2050)	
P-d	Investiga formas mais apropriadas para novo edifício	P-o	Observa no novo edifício as proporções dos volumes, a relação entre cheios/vazios e unidade com o entorno
P-c	Compreende os efeitos de possíveis relações espaciais	P-c	Investiga a disposição das edificações em relação a melhor iluminação e ventilação
P-o	Experimenta diferentes relações de massas e volumes no volume do novo edifício e observa os efeitos e as relações com os demais blocos	P-d	Descobre os efeitos das articulações entre os edifícios.

*Aula 3*Grupo 2

Categoria Perceptual			
Segmento 1 (19h30)		Segmento 2 (20h)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
P-c	Estabelece características da forma que melhor expressem uma proposta	P-c	Estabelece novo perfil de forma, que ainda expresse certa complexidade
P-c	Compreende limitações de exploração formal	P-d	Descobre relação entre forças, material e forma
Segmento 3 (20h30)		Segmento 4 (21h)	
P-o	Observa características da forma gerada	P-d	Descobre como estabelecer alterações mais significativas nas formas visando certa complexidade
P-d	Descobre a relação entre forças e formas		
P-d	Verifica a geração da forma a partir de casca (simulando involução), casca aberta nas laterais (simulando estrutura)		
P-c	Compreende que as relações espaciais não eram aquelas desejadas	P-c	Compreende relações espaciais.

Grupo 4

Categoria Perceptual			
Segmento 1 (19h)		Segmento 2 (19h40)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
P-o	Observa como a forma é gerada mediante os dados de entrada	P-o	Observa a geração da forma em outros volumes
P-d	Descobre relações entre cargas, apoios, materiais e forma	P-c	Compreende as formas geradas (cheios/ vazios, escala/ proporção, etc.) e como se utilizam essas formas dentro do programa estabelecido
Segmento 3 (20h20)		Segmento 4 (21h)	
P-o	Compara as formas com outras	P-o	Observa a geração da forma em outros volumes
P-o	Verifica outras possibilidades formais	P-c	Compreende-se o potencial das formas geradas

Grupo 5

Categoria Perceptual			
Segmento 1 (19h44)		Segmento 2 (20h14)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
P-o	Observa os efeitos do BESO na geração da forma	P-o	Observa problemas na geração e tenta corrigir visando à obtenção de possíveis formas desejadas
P-d	Investiga geração de formas mais complexas	P-c	Compreende problemas e procura modos de sanar
Segmento 3 (20h44)		Segmento 4 (21h14)	
P-o	Compreende motivos do erro e passa a gerar formas visando acertos	P-o	Observa nova geração da forma e especula sobre novas relações entre forças e formas
P-d	Descobre novas relações de cheios e vazios	P-d	Descobre novas relações formais decorrentes das cargas.

Categorias Funcionais

Aula 1

Grupo 2

Categoria Funcional			
Segmento 1 (19h30)		Segmento 2 (20h5min)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
U-a	Verifica viabilidade de implantação dos blocos	U-a	Verifica viabilidade de implantação dos blocos
U-a	Efeitos da disposição na ventilação e iluminação		
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h15)	
U-a	Verifica recuos, acessos, afastamentos entre blocos	U-a	Testa nos cortes a adequação da implantação no terreno
U-s	Testa se as relações propostas são satisfatórias ou não	U-s	Verifica o conforto espacial da solução.

Grupo 4

Categoria Funcional			
Segmento 1 (19h40)		Segmento 2 (20h10)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
U-a	Estuda viabilidade de implantação dos blocos pré-fabricados	U-a	Estuda viabilidade de implantação dos blocos pré-fabricados
		U-a	Estuda condições de conforto para instalação do programa proposto para a(s) nova(s) construção(ões)
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h10)	
U-a	Estuda recuos, acessos e afastamentos entre os blocos pré-fabricados e entre estes e o novo edifício	U-a	Estuda conforto visual dos elementos de articulação entre os blocos.
U-s	Esboça como poderia ficar o conforto espacial da solução discutida		

Grupo 5

Categoria Funcional			
Segmento 1 (19h20)		Segmento 2 (19h50)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
U-a	Verifica viabilidade de implantação dos blocos	U-a	Testa adequação da forma com dimensionamento estabelecido no programa e curvas de nível
Segmento 3 (20h20)		Segmento 4 (20h50)	
U-a	Verifica recuos, acessos, afastamentos e alturas dos blocos pré-fabricados e do novo bloco	U-a	Testa e discute adaptação das funções planejadas com os condicionantes do programa e terreno
U-s	Discute se a proposta é satisfatória em termos da relação forma x função	U-s	Verifica o conforto espacial da solução.

*Aula 3*Grupo 2

Categoria Funcional			
Segmento 1 (19h30)		Segmento 2 (20h)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
Segmento 3 (20h30)		Segmento 4 (21h)	
U-a	Verifica se a forma gerada atende aos requisitos funcionais	U-a	Vê como a forma gerada poderia ser usável
U-s	Verifica a viabilidade da forma	U-s	Verifica o conforto espacial da solução.

Grupo 4

Categoria Funcional			
Segmento 1 (19h)		Segmento 2 (19h40)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
U-a	Observa a adequação entre volume e possível ocupação interna	U-a	Relaciona o volume gerado com espaços definidos no programa, estabelecendo as unidades funcionais mínimas (cômodos) dentro do espaço
U-a	Verifica a funcionalidade de novas formas	U-s	Verifica adequação funcional dos espaços
Segmento 3 (20h20)		Segmento 4 (21h)	
U-a	Testa novas formas para atender a novas funções (praça externa)	U-a	Discute a funcionalidade das formas e define os principais encaminhamentos formais.
U-a	Verifica a funcionalidade de novas formas		

Grupo 5

Categoria Funcional			
Segmento 1 (19h44)		Segmento 2 (20h14)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
U-s	Procura gerar formas elementares e verificar sua adequação para espaços arquitetônicos	U-a	Procura adequar forma, definida pelo grupo como funcionalmente eficiente, com volumetria exigida pelo BESO
U-a	Procura adequar forma, definida pelo grupo como funcionalmente eficiente, com volumetria exigida pelo BESO		
Segmento 3 (20h44)		Segmento 4 (21h14)	
U-a	Indica a posição das cargas e apoios que atendam melhor à posição do novo edifício no terreno e as questões funcionais	U-s	Verifica se forma gerada pode satisfazer a condições ambientais, como boa iluminação, dimensões mínimas, etc.
U-a	Procura adequar forma desejada com volumetria exigida pelo BESO	U-a	Discute funcionalidade da forma gerada e discute como melhorar

Categorias Conceitual*Aula 1*Grupo 2

Categoria Conceitual			
Segmento 1 (19h30)		Segmento 2 (20h5min)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
C-m	Discute possibilidades de eixos de implantação	C-p	Avalia possíveis agrupamentos
C-m	Preferência em aproveitar o fluxo de pedestres	C-m	Discute possibilidades de eixos de implantação
		c-m	Define metas de usos, relações formais e como usar o método BESO
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h15)	
C-m	Define implantar estacionamento na esquina do terreno, de modo a facilitar o acesso	C-p	Avalia solução proposta
-p	Avalia se a organização pode ser satisfatória	-m	Verifica se está atendendo às especificações do projeto.

Grupo 4

Categoria Conceitual			
Segmento 1 (19h40)		Segmento (20h10)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
C-m	Discute principais metas da proposta	C-p	Avalia possíveis agrupamentos dos blocos pré-fabricados
Segmento 3 (20h40)		Segmento 4 (21h10)	
C-p	Avalia a implantação dos blocos pré-fabricados e do novo edifício	C-m	Estabelece metas formais para definição da morfologia do novo edifício e da estrutura de cobertura que une os blocos
C-p	Avalia soluções espaciais esboçadas	C-p	Avalia a distribuição espacial esboçada e redefine possíveis articulações.

Grupo 5

Categoria Conceitual			
Segmento 1 (19h20)		Segmento 2 (19h50)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
C-m	Discute metas para implantação de edifício no terreno	C-p	Demonstram preferência por verticalizar, mas verificam que é impossível
C-p	Avaliações tipologia dos blocos pré-fabricados e acessibilidade	C-c	Fazem referência à outros projetos
		C-c	Avaliam solução implantação
Segmento 3 (20h20)		Segmento 4 (20h50)	
C-p	Avaliam solução novo edifício	C-p	Avaliam o novo edifício e a implantação
C-m	Revêem as metas formais e funcionais do novo edifício	C-m	Comparam metas propostas e metas a que se chegou no projeto.

*Aula 3*Grupo 2

Categoria Conceitual			
Segmento (19h30)		Segmento 2 (20h)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
C-p	Avalia que forma poderia ser gerada usando o BESO	C-p	Reavalia a forma
C-m	Determina metas formais	C-m	Refaz metas formais
Segmento 3 (20h30)		Segmento 4 (21h)	
C-p	Avalia forma gerada como ruim	C-p	Avalia as novas soluções como melhores
C-m	Busca novas configurações formais	C-m	Busca meta formal e explora

Grupo 4

Categoria Conceitual			
Segmento 1 (19h44)		Segmento 2 (20h14)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
C-p	Avalia as formas geradas no BESO	C-p	Avalia as formas geradas no BESO
C-p	Avalia as formas geradas no BESO	C-m	Determina novas metas formais para a proposta (usando o BESO para a criação de parede)
C-p	Avalia as formas geradas no BESO	C-p	Avalia as formas geradas no BESO
		C-c	Utiliza conhecimentos anteriores sobre área e dimensionamento para desenhar plantas
		C-p	Avalia as formas geradas no BESO
Segmento 3 (20h44)		Segmento 4 (21h14)	
C-p	Avalia as formas geradas no BESO	C-p	Avalia as formas geradas no BESO
C-m	Determina novas metas formais para o edifício (usando o BESO para a criação de praça)	C-p	Avalia as formas geradas no BESO

Grupo 5

Categoria Conceitual			
Segmento 1 (19h44)		Segmento 2 (20h14)	
Abr.	Conteúdo	Abr.	Conteúdo
C-p1	Avalia a forma gerada no BESO		
C-m1	Discute como se adaptam as metas formais às metas funcionais definidas pela equipe		
Segmento 3 (20h44)		Segmento 4 (21h14)	
C-p2	Avalia a forma gerada no BESO	C-p3	Avalia a forma gerada no BESO
C-m	Rediscute como se adaptam as metas formais às metas funcionais definidas pela equipe	C-m3	Rediscute como se adaptam as metas formais às metas funcionais definidas pela equipe

**Apêndice C - Questionário Q1 - aplicado aos alunos da
disciplina AU 120**

AU 120 – Projeto Integrado e Colaborativo

Profa. Regina Ruschel

PED Doutorando Max Andrade

2º sem. 2011 - 6af, 19h-22h40, CA37

- Número do Grupo: _____
- RA: _____

QUESTIONÁRIO 1

1. Quais dentre os aplicativos abaixo vc tem experiência e qual o nível de expertese:

APLICATIVO		CONHECIMENTO/HABILIDADE		
a.	AUTOCAD	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
b.	REVIT ARCHITECTURE	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
c.	DIGITAL PROJECT	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
d.	ARCHICAD	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
e.	BENTLEY ARCHITECTURE	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
f.	VECTOR WORKS	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
g.	SKETCHUP	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
h.	3DS MAX	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
i.	RHINOCEROS	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
j.	GENERATIVE COMPONENTS	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
k.	GRASSHOPPER	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
l.	VISUAL-LISP	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
m.	VISUAL-BASIC	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
n.	ECOTECT	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
o.	ECODESIGN	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
p.	SOLIBRI	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
q.	CFD	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
r.	ENERGY PLUS	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
s.	ANSY	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
t.	ODEON	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
u.	RSTAB	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
v.	GSA	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
w.	STRAND	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO
x.	OUTRO(s) _____	<input type="checkbox"/> BAIXO	<input type="checkbox"/> MÉDIO	<input type="checkbox"/> ALTO

2. Como utilizou estas ferramentas?

APLICATIVO		AMBIENTE		
a.	AUTOCAD	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
b.	REVIT ARCHITECTURE	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
c.	DIGITAL PROJECT	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
d.	ARCHICAD	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
e.	BENTLEY ARCHITECTURE	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
f.	VECTOR WORKS	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
g.	SKETCHUP	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
h.	3DS MAX	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
i.	RHINOCEROS	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
j.	GENERATIVE COMPONENTS	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
k.	GRASSHOPPER	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
l.	VISUAL-LISP	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
m.	VISUAL-BASIC	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
n.	ECOTECT	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
o.	ECODESIGN	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
p.	SOLIBRI	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
q.	CFD	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
r.	ENERGY PLUS	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
s.	ANSY	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
t.	ODEON	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
u.	RSTAB	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
v.	GSA	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
w.	STRAND	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto
x.	OUTRO (s) _____	<input type="checkbox"/> Não utilizou	<input type="checkbox"/> ensino	<input type="checkbox"/> em projeto

**Apêndice D - Questionário Q2 - aplicado aos alunos da
disciplina AU 120**



AU 120 – Projeto Integrado e Colaborativo

Profa. Regina Ruschel

PED Doutorando Max Andrade

2º sem. 2011 - 6af, 19h-22h40, CA37

- Número do Grupo: _____
- RA (alunos): _____

QUESTIONÁRIO 2

1. Descrever as principais decisões tomadas após o uso do Método BESO em sala de aula.

2. Houve alterações nas diretrizes da proposta com o uso do Método BESO? Se sim, que tipo de alterações?

3. Qual a primeira reação ao uso do método? Auxiliou na proposta? Ajuda na criatividade? Dificulta o processo criativo?

4. Descrever as principais decisões tomadas durante a semana do dia 23/09.

**Apêndice E - Questionário Q3 - aplicado aos alunos da
disciplina AU 120**

AU 120 – Projeto Integrado e Colaborativo

Profa. Regina Ruschel

PED Doutorando Max Andrade

2º sem. 2011 - 6af, 19h-22h40, CA37

- Número do Grupo: _____
- RA (alunos): _____

QUESTIONÁRIO 3

1. Houve alterações nas diretrizes da proposta, durante esta semana, influenciadas pelo uso do Método BESO? Se sim, que tipo de alterações?

2. Depois de utilizar o método BESO por duas semanas, quais as reações ao uso do mesmo? Auxiliou na proposta? Ajuda na criatividade? Dificultou o processo criativo?

3. Após essa primeira experiência com o uso do BESO vocês têm interesse em utilizar em outras experiências de projeto? Sim ou Não? Justifique.

4. Quais os softwares utilizados no desenvolvimento do estudo preliminar?

5. Quais os principais desempenhos priorizados no estudo preliminar?

6. Comparado com métodos tradicionais de projeto:

6.1 O tempo gasto na realização das tarefas foi?

Maior	Idêntico	Menor

6.2 A flexibilidade do método em lidar com mudanças e com o inesperado foi?

Menor	Idêntico	Maior

6.3 A possibilidade de pensar a solução de modo mais dúbio foi?

Menor	Idêntico	Maior

6.4 Comparado com outros softwares já usados a facilidade em manipulação do software foi?

Menor	Idêntico	Maior

6.5 A facilidade em se chegar aos resultados almejados foi?

Menor	Idêntico	Maior

**Apêndice F - Entrevista - aos alunos da disciplina AU 120 após a
realização da experiência didática**

AU 120 – Projeto Integrado e Colaborativo

Profa. Regina Ruschel

PED Doutorando Max Andrade

2º sem. 2011 - 6af, 19h-22h40, CA37

- Número do Grupo: _____
- RA (alunos): _____

ENTREVISTA

Esta entrevista tem como objetivo compreender as ações cognitivas realizados por vocês durante as atividades de projeto das aulas do dia 09 e 23 de setembro. Durante esta entrevista serão feitos alguns questionamentos, mostrados algumas fotos e pedido para que vocês descrevam o que aconteceu nos diferentes momentos do processo de projeto. Esse procedimento, denominado de análise de protocolo, permite fornecer pistas sobre as seqüências das atividades que foram realizadas, as dúvidas, os retrabalhos, os pensamentos, os tipos de interação, etc. Estas informações serão usadas para ajudar a compreender as motivações das suas ações projetuais e como elas resultaram no produto.

1. A partir deste momento serão apresentadas algumas imagens e nós gostaríamos que vocês descrevessem verbalmente o que estava acontecendo (em termos de pensamentos, discussões, ações físicas, percepções, discussões, etc.) em cada um daqueles momentos registrados nas fotos.

2. Após o relato de cada segmento são questionados se algumas das categorias físicas, perceptuais, funcionais e conceituais descritas são verídicas ou não e quais outras ações poderiam ser acrescentadas a cada um destes segmentos.

4. Como se deu o processo de trabalho extra classe? Relate. Vocês consideram que as principais decisões de projeto foram tomadas durante as aulas ou nas atividades extra classe? Vocês poderiam descrever que atividades foram essas?
